

VITOR MIGUEL BARATA PINTO

Actividades elementares sobre som e luz

Dissertação, orientada pelo Professor Doutor João Pinheiro da Providência e Costa, apresentada à Universidade da Beira Interior, como requisito para a obtenção do grau de mestre em Ensino de Física e Química no 3º Ciclo e no Ensino Secundário

Universidade da Beira Interior

Covilhã - 2011

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor João Providência, pela permanente e competente orientação do trabalho e pela disponibilidade total para me receber sempre que o solicitei.

À minha mulher e aos meus filhos pelo apoio e encorajamento.

Aos alunos das turmas A e B do 8º Ano da Escola E.B. 2/3 do Paúl pela participação activa durante a implementação das actividades experimentais.

Resumo

As aulas de Física e Química no ensino básico devem favorecer uma cultura científica que estimule o espírito crítico e participativo, promovendo o desejo e o gosto de aprender.

Este projecto pretende promover estes estímulos através da realização de aulas experimentais que contemplem actividades que consolidem os conceitos significativos e as ideias cientificamente aceites sobre o som e a luz. As actividades foram seleccionadas e adaptadas a partir de manuais escolares e livros de divulgação científica utilizados em Portugal, França, Brasil e Estados Unidos da América.

Todas as actividades são enquadradas com o desenvolvimento teórico necessário à sua compreensão e, ao mesmo tempo, contribuem, em muitos casos, para a reestruturação das ideias prévias que os alunos possuem sobre som e luz.

Este projecto envolveu vinte e oito alunos do oitavo ano de escolaridade e, ao mesmo tempo que acompanhava o cumprimento do programa previsto para este nível, procurou-se estimular os alunos a expor as suas ideias, a pesquisar e, nalguns casos, orientá-los na planificação de actividades que comprovem essas ideias.

Este estudo é limitado pelo número de alunos e o tempo disponível para a leccionação da disciplina de ciências físico-químicas no oitavo ano de escolaridade. No entanto, os resultados obtidos comprovam que a realização de actividades experimentais diversificadas e que muitas vezes fazem uso de material simples disponível em todos os laboratórios e a utilização das tecnologias de informação e comunicação possibilita uma aprendizagem significativa dos conceitos e um maior interesse pelas ciências experimentais.

Palavras-chave

Ondas sonoras, atributos do som, reflexão, refacção, luz, espelhos, lentes.

Abstract

Physics and chemistry classes in basic levels of education should favour a scientific culture that stimulates the participatory mind and critical thinking besides promoting the desire to learn.

This project intends to promote these stimuli throughout experimental classes contemplating activities that consolidate meaningful concepts and scientifically accepted ideas of light and sound. The activities were selected and adapted from school books and popular science books used in Portugal, France, Brazil and the United States of America.

All the activities are in accordance with the theoretical development needed towards comprehension and which, at the same time, in many cases, contribute to the restructuring of previous ideas that students might have of light and sound.

This project entailed twenty eight 8th grade students and, whilst following the established curriculum for students of this level, they were encouraged to expose their ideas, to do research and, in some cases, to guide them in planning the activities that prove those ideas.

This study is limited by the number of students and the time available for teaching Physical and Chemical Sciences in 8th grade. However, the obtained results show that through several experimental classes where simple material is used, available in every laboratory together with the use of information and communication technology, it enhances a meaningful learning of concepts and a greater interest in experimental sciences.

Key-Words

Sound waves, sound characteristics, reflection, refraction, light, mirrors, lenses.

Índice

1. Introdução	2
2. Actividades elementares sobre som	
2.1 Produção e transmissão do som	5
2.2 Tipos de ondas	8
2.3 Características das ondas	11
2.4 Determinação da velocidade do som	17
2.5 Atributos do som	28
2.6 Propriedades das ondas sonoras	38
2.7 Espectro sonoro	46
3. Actividades elementares sobre luz	
3.1 Propagação rectilínea da luz	49
3.2 Reflexão da luz e espelhos	52
3.3 Refracção da luz e lentes	65
3.4 Estrutura do olho humano	76
4. Conclusões	79
5. Bibliografia	82

1. Introdução

When I heard the learn'd astronomer;
When the proofs, the figures, were ranged in columns before me;
When I was shown the charts and the diagrams, to add, divide, and measure them;
When I, sitting, heard the astronomer, where he lectured with much
applause in the lecture-room,
How soon, unaccountable, I became tired and sick;
Till rising and gliding out, I wander'd off by myself,
In the mystical moist night-air, and from time to time,
Look'd up in perfect silence at the stars.

-Walt Whitman, *Leaves of Grass*

Quantos dos nossos alunos, tal como no poema de Whitman, são atraídos pela aula que lhes explica os mistérios do universo e depois são confrontados com a apresentação sistemática de números, evidências, gráficos e diagramas e ficam desmotivados e desistem? Quando ensinamos ciência, devemos tentar explicar e entender o mundo que nos rodeia, despertar a curiosidade do aluno e levá-lo a interagir com esse mundo sem, no entanto, descurar a orientação das observações e fornecer o referencial teórico adequado.

No currículo nacional do ensino básico é referido que o entendimento da ciência é essencial na sociedade de informação e conhecimento, não só como um corpo de saberes mas também enquanto instituição social. Desta forma, a literacia científica é fundamental para o exercício pleno da cidadania, uma vez que em várias situações o cidadão é confrontado com temas científicos com implicações sociais e nesse caso é chamado a dar a sua opinião. No documento orientador é ainda preconizado o desenvolvimento de um conjunto de competências que se revelem em diferentes domínios, tais como o conhecimento, o raciocínio, a comunicação e as atitudes como sendo essenciais para a literacia científica. Para além destas competências, é também essencial na educação científica a aquisição de conceitos científicos, a compreensão da natureza da ciência e a consciencialização das relações entre ciência, tecnologia e sociedade.

O desenvolvimento de competências nestes diferentes domínios exige o envolvimento do aluno no ensino aprendizagem. Para concretizar e desenvolver essas competências considere relevante a realização de actividades experimentais. O trabalho experimental contribui ainda para a aquisição do conhecimento e das competências necessárias para a

realização de pesquisas científicas e para a resolução de problemas em investigações experimentais.

A eficiência desta estratégia reside em dois aspectos fundamentais (Araujo e Abib, 2003): em primeiro lugar, a capacidade de estimular a participação activa dos alunos, despertando a curiosidade e interesse, favorecendo um envolvimento efectivo com a aprendizagem e, em segundo, a tendência de possibilitar a construção de um ambiente motivador, agradável, estimulante e rico em situações novas e desafiadoras que aumentam a probabilidade de que sejam elaborados conhecimentos e sejam desenvolvidas atitudes e competências científicas.

O ensino do som e da luz é feito, na maior parte das vezes, recorrendo unicamente ao quadro e giz ou, nalguns casos, a demonstrações feitas pelo professor e onde o aluno participa muito pouco, quer na sua planificação, quer na sua discussão. Destas demonstrações, na maior parte dos casos, não resulta um verdadeiro conhecimento científico, já que sem um enquadramento teórico suscitador da curiosidade, a simples observação torna-se muitas vezes inútil ou conduz até a resultados indesejáveis. Considerando que estas duas áreas podem ser extremamente motivadoras para os alunos e que estão associadas a dois sentidos, audição e visão, sem os quais pouca actividade humana seria possível, surgiu a ideia da selecção de actividades experimentais sobre o som e a luz que possam ser utilizadas pelos professores total ou parcialmente nas suas aulas.

As actividades experimentais seleccionadas nesta dissertação podem ser classificadas em duas categorias (Cachapuz *et al*, 1999):

- a) demonstrações - actividades experimentais, qualitativas ou quantitativas, que proporcionam ao aluno a visualização de fenómenos, verificação de leis, compreensão de conceitos abstractos ou ilustração de conceitos teóricos.
- b) pequenas investigações - actividades onde existe a preocupação de resolver um problema seguindo uma estratégia definida pelo aluno que requerem normalmente um controle de variáveis, medições e tratamento de dados.

Nas actividades englobadas no grupo das demonstrações, deve ser solicitado aos alunos a previsão do que se irá passar e durante a demonstração devem registar as suas observações e posteriormente deverá ser feita uma confrontação entre estas observações e as previsões efectuadas (Gunstone, 1998).

Nas pequenas investigações poderá ser utilizado o modelo proposto no programa de Física e Química B do Ministério da Educação (Departamento do Ensino Secundário, 2001). A Figura 1.1 apresenta um diagrama que resume os seus aspectos fundamentais:

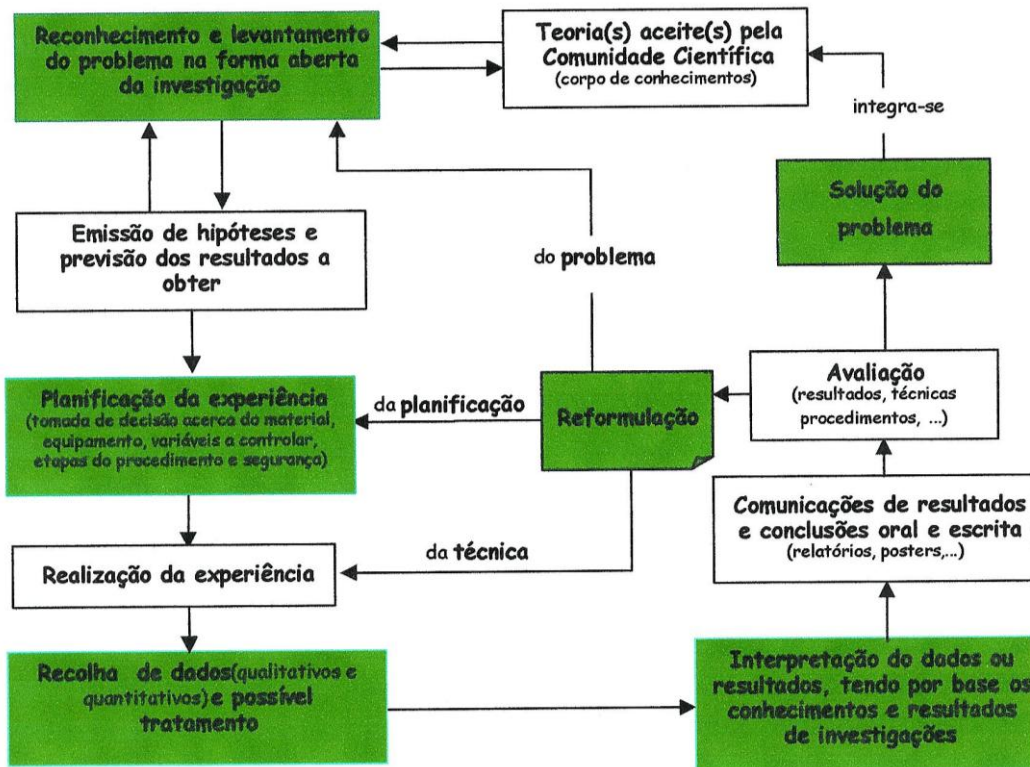


Figura 1.1 - Modelo de resolução de problemas para investigações práticas (adaptado do programa de Física e Química B, 10º Ano, DES, 2001)

Todas as actividades têm uma abordagem dos principais conceitos envolvidos, encontrando a fundamentação teórica no conhecimento científico actualmente aceite. Esta fundamentação encontra eco na principal causa apontada por Gowin (Novak e Gowin, 1996) para a fraca correlação entre os resultados escolares e o ensino experimental. Considerava Gowin como principal causa desse insucesso, o facto de os alunos darem especial atenção aos fenómenos observados mas pouca aos conceitos ou teorias que estão subjacentes às observações.

A utilização do computador e outros instrumentos com base tecnológica (instrumentos eléctricos ou electrónicos e audiovisuais) foi feita como parte integrante da vivência de fenómenos físicos e não como geradores de modelos artificiais “perfeitos”. A utilização de *applets* e modelos, embora possa ter um papel importante na introdução de um conceito teórico novo ou para simular condições que dificilmente são obtíveis no laboratório, limitam a compreensão do que é “fazer” ciência e impossibilitam os eventuais insucessos experimentais que, se convenientemente explorados pelo professor, podem ser bastante valiosos do ponto de vista formativo.

A dissertação contempla actividades experimentais sobre o som no primeiro capítulo e actividades experimentais sobre a luz no segundo capítulo.

2. Actividades elementares sobre som

2.1 Produção e transmissão do som

O conceito de som está associado à sensação de audição. Com efeito, sempre que uma onda elástica se propaga através de um meio material e atinge o nosso ouvido ela produz vibrações no tímpano. Os sons têm origem na vibração de corpos que se transmite através dos sólidos, líquidos ou gases. As actividades propostas nesta secção pretendem comprovar que na origem de um som está normalmente uma vibração, ou seja, o som é produzido pela vibração de um corpo - a fonte sonora.

Actividade 2.1

A utilização de um diapasão e um reservatório de água permite verificar a transmissão da vibração do diapasão às partículas da água.



Figura 2.1 - Comunicação da vibração do diapasão às partículas da água.

Actividade 2.2

Ao colocar grãos de arroz na pele de um tambor e percutindo uma tampa colocada na proximidade será visível o saltitar dos grãos sobre a membrana do tambor.



Figura 2.2 - Comunicação da vibração da tampa aos grãos sobre o tambor.

Os instrumentos musicais são também exemplos de fontes sonoras. Esses instrumentos musicais podem ser classificados em instrumentos de sopro, instrumentos de cordas e instrumentos de percussão. Nos instrumentos de sopro, o ar ao passar no interior dos tubos acústicos entra em vibração e emite sons. Nos instrumentos de cordas são as cordas que vibram em conjunto com o ar na caixa do instrumento e nos de percussão o princípio de funcionamento baseia-se na vibração de membranas quando agitadas.

Actividade 2.3

O vídeo <http://www.youtube.com/watch?v=v4DTR0I7xhA> permite identificar um exemplo de cada um destes instrumentos, nomeadamente: o saxofone como instrumento de sopro, o contrabaixo como instrumento de cordas e a bateria como instrumento de percussão.

Actividade 2.4

No interior de um tubo é possível colocar em vibração o ar aí existente. Assim, se variarmos o comprimento da coluna de ar iremos produzir diferentes sons. Quanto menor for o comprimento da coluna de ar, maior será a frequência do som, produzindo-se então um som mais agudo. É este princípio que está na base da construção da flauta obtida, utilizando tubos de plástico rígidos de diferentes comprimentos, conforme a Figura 2.3.

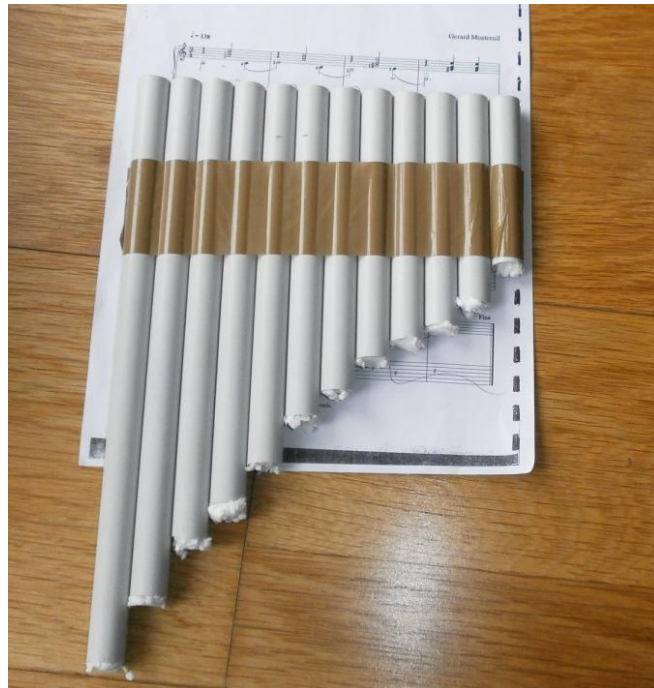


Figura 2.3 - Flauta construída, pelos alunos, utilizando tubos rígidos.

Quando um oscilador, depois de uma perturbação inicial, é abandonado a si próprio executa oscilações livres com a sua frequência própria e a amplitude diminuirá até zero devido ao amortecimento. No entanto, o oscilador pode experimentar uma força externa com uma intensidade que varia periodicamente com o tempo: por exemplo, num baloiço, alguém pode estar a empurrar com um certo ritmo, neste caso a oscilação é forçada. O oscilador para além de estar sujeito à força restauradora, está também sujeito à força externa. O fenómeno da ressonância poderá ocorrer quando a frequência associada à força externa é igual à frequência própria do sistema. No caso do baloiço se a pessoa que está a empurrar, o fizer com uma frequência igual à frequência própria, a amplitude do movimento vai aumentar, isto é, o baloiço sobe cada vez mais alto.

Quando percutimos o diapasão fora da caixa, o som não é percebido porque a amplitude do som produzido é muito pequena e só consegue ser percebido quando o colocamos perto do ouvido. Se efectuarmos essa percussão com o diapasão colocado na caixa respectiva, o som passa a ser facilmente percebido porque a amplitude aumentou, existindo uma interferência construtiva das ondas no interior da caixa. A caixa tem uma extremidade aberta e dimensões tais que o ar nela contido possui a mesma frequência de vibração do diapasão. Desta forma o ar vibra em ressonância com o diapasão e ondas com amplitudes elevadas são emitidas através da abertura da caixa.

Actividade 2.5

A energia das ondas sonoras é, em geral, pequena. No entanto, por ressonância, estas ondas conseguem provocar vibrações em corpos elásticos que possuam frequência própria igual à sua. Esta propriedade pode ser verificada utilizando dois diapasões com a mesma frequência colocados nas respectivas caixas (Figura 2.4). Com o martelo percute-se o primeiro diapasão e, de seguida, toca-se-lhe com a mão para que a vibração se extinga, verifica-se que o outro diapasão está a vibrar. Isto aconteceu porque o primeiro diapasão colocou o ar da caixa a vibrar por ressonância e esta emitiu ondas sonoras que provocaram a vibração do ar da segunda caixa. Estas vibrações do ar fizeram vibrar a madeira da caixa e estas colocaram o segundo diapasão em vibração.



Figura 2.4 - Verificação da ressonância utilizando dois diapasões.

2.2 Tipos de ondas

Quando se toca um sino, as ondas do mar se deslocam em direcção à costa ou se liga um interruptor e a luz preenche toda a divisão, tem-se uma situação física (uma perturbação, uma alteração) produzida num ponto do espaço, propagando-se através deste e que é detectada noutra ponto, transferindo-se energia sem transferir matéria. Estas ondas rodeiam-nos, podemos mesmo afirmar que vivemos num “banho de ondas”.

Actividade 2.6



Figura 2.5 - Verificação da formação de uma deformação na superfície da água.

Na montagem ilustrada na Figura 2.5, inicialmente a superfície da água está parada, mas ao deixar cair uma gota de água da bureta forma-se uma deformação circular centrada no ponto de impacto e cujo raio cresce linearmente com o tempo. Outros círculos de deformação são gerados a partir do ponto de impacto e durante algum tempo o espelho de água fica marcado por um padrão de círculos que irradiam com velocidade uniforme do ponto inicial em que caiu a gota. Com o passar do tempo a intensidade das deformações vai diminuindo, até que finalmente a superfície da água volta à forma inicial.

Quando se ouve um trecho musical, o emissor (por exemplo uma corda de guitarra) vibra e comprime periodicamente a matéria envolvente e dá origem a uma onda sonora que acaba por impressionar os ouvidos dos receptores. Ao olhar à nossa volta, existem inúmeros objectos que são fontes de ondas luminosas detectadas pelos olhos.

No entanto, se as ondas luminosas podem chegar desde o Sol até à Terra, atravessando grande parte do percurso na ausência de um meio material, as ondas sonoras só conseguem propagar-se se existir um meio material sólido, líquido ou gasoso. As ondas luminosas conjuntamente com a luz ultravioleta, as ondas de rádio e de televisão, as microondas, os raios X e as ondas de radar fazem parte de um tipo de ondas denominadas

ondas electromagnéticas, uma vez que a sua propagação resulta de variações de um campo eléctrico e magnético e podem propagar-se no vazio. As ondas sonoras, as ondas sísmicas, as ondas do mar são ondas que necessitam de um meio material para se propagar, estas ondas são designadas como ondas mecânicas.

Actividade 2.7

Se colocarmos um objecto sobre a água do mar, a onda propaga-se na direcção horizontal mas o objecto oscilará sempre verticalmente. Neste caso, a direcção de propagação da onda (horizontal) é perpendicular à direcção de vibração dos corpúsculos da água (vertical). Ondas deste tipo designam-se ondas transversais. As ondas electromagnéticas são ondas transversais.

As ondas transversais podem ser simuladas utilizando uma mola e efectuando uma perturbação na direcção perpendicular ao eixo longitudinal da mola (oscilando a mola) e verificar que a perturbação se propaga na horizontal. (Figura 2.6)



Figura 2.6 - Formação de uma onda transversal numa mola.

Actividade 2.8

No caso da propagação do som no ar, a direcção de propagação coincide com a direcção de vibração dos corpúsculos do ar, ou seja, estamos perante ondas longitudinais.

Estas ondas podem ser simuladas utilizando uma mola e efectuando uma perturbação para trás e para a frente na extremidade da mola perpendicularmente ao seu eixo. Verificamos que a perturbação se propaga na mesma direcção da mola.



Figura 2.7 - Formação de uma onda longitudinal numa mola.

Actividade 2.9

As ondas podem ser compreendidas utilizando uma serra com uma agulha presa colocada sobre um vidro enegrecido com o fumo de vela (Figura 2.8). A agulha deve tocar muito ao de leve no vidro. A serra deve ser colocada em vibração e em seguida deve-se deslocar o vidro muito lentamente. A agulha traçará no vidro uma série de curvas regulares (Figura 2.9). Estas ondas não são na realidade ondas sonoras, uma vez que estas resultam de compressões e rarefações do ar, mas uma forma de as simular.



Figura 2.8 - Montagem para a “visualização” das ondas sonoras.



Figura 2.9 - Ondas traçadas pela agulha no vidro enegrecido com fumo de vela.

2.3 Características das Ondas

Na secção “tipos de ondas” foram originadas sequências de pulsos ao repetir periodicamente a agitação em dois sentidos opostos da extremidade de uma mola. Se os pulsos forem iguais e emitidos em intervalos de tempo iguais, obtém-se uma onda periódica.



Figura 2.10 - Onda transversal numa mola.

A Figura 2.10 representa a mola, num dado instante, sendo clara a periodicidade no espaço. Esta repetição ou periodicidade é caracterizada pelo comprimento de onda, λ , da onda- distância (paralela à direcção de propagação da onda) entre repetições da forma de onda, ou seja, a distância entre dois pontos consecutivos com o mesmo afastamento das posições de equilíbrio e o mesmo movimento oscilatório. Uma vez que o comprimento de onda é uma distância, a respectiva unidade SI é o metro. Na figura podemos ainda verificar a existência de pontos onde o afastamento relativamente à posição de equilíbrio é máxima. Este afastamento permite definir a amplitude, A , de uma onda como o módulo do deslocamento máximo dos elementos a partir da posição de equilíbrio quando a onda passa por eles.

No caso de uma onda sonora, que se propague no ar, o movimento vibratório das partículas do ar origina zonas com mais partículas e outras zonas com menos. As zonas onde existem mais partículas correspondem a zonas de compressão e têm pressão maior do que a pressão normal do ar. As zonas onde existem menos partículas serão zonas de rarefacção e aí a pressão será menor do que a pressão normal do ar. Assim, numa onda sonora o comprimento de onda corresponderá à distância entre duas compressões, ou duas rarefacções sucessivas, e a amplitude o módulo da diferença entre a pressão numa zona de compressão, ou rarefacção, e a pressão normal.

Seleccionando um ponto da mola e estudando o deslocamento desse ponto em função do tempo, teremos um gráfico semelhante ao da Figura 2.11,

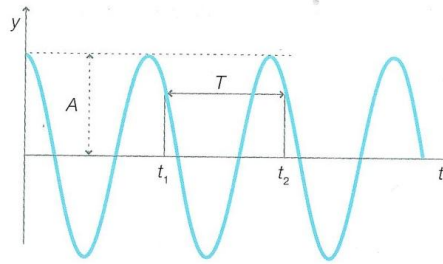


Figura 2.11 - Periodicidade temporal da onda (adaptado de Ventura, 2008).

podendo verificar que o ponto seleccionado se movimentava para cima e para baixo com um movimento harmónico simples dado pela equação:

$$y = A \text{ sen } (\omega t) \quad (2.1)$$

Define-se período, T , de oscilação de uma onda como o tempo que um elemento demora a realizar uma oscilação completa (a respectiva unidade SI é o segundo). A frequência, f , da onda corresponde ao número de oscilações por segundo e tem como unidade SI o Hertz (Hz). A partir das definições anteriores podemos relacionar a frequência e o período através da expressão:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Para “visualizar” uma onda sonora pode ligar-se um microfone a um osciloscópio, uma calculadora gráfica ou a um computador com software adequado (por exemplo: <http://www.zelscope.com/>). O microfone converte as vibrações do ar em sinais eléctricos, ou seja, capta as variações de pressão e transforma energia mecânica emitida pela fonte em energia eléctrica. O microfone electromagnético contém uma membrana que vibra quando é atingida pela onda sonora, acoplada à membrana encontra-se uma bobina que se move solidariamente. Nesta região existe um campo magnético criado por um íman fixo que faz parte da constituição do microfone (Figura 2.12). O movimento relativo da bobina em relação ao íman provoca uma variação do fluxo magnético nas espiras e dessa forma é criada uma força electromotriz induzida nos terminais da bobina. A corrente eléctrica alternada assim produzida contém a mesma informação (características correspondentes) da onda sonora que faz vibrar a membrana do microfone.

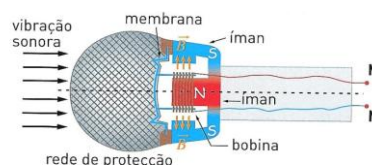


Figura 2.12 - Microfone electromagnético (adaptado de Marques da Silva, 2008).

No entanto, há outros microfones cujo princípio de funcionamento é baseado na piezoelectricidade ou na capacidade eléctrica.

Actividade 2.10

Para determinar a frequência da onda sonora produzida por um diapasão efectua-se a montagem da Figura 2.13.



Figura 2.13, 2.14 - Montagem para determinação do período da onda sonora produzida pelo diapasão e grupo de alunos a efectuar a actividade experimental.

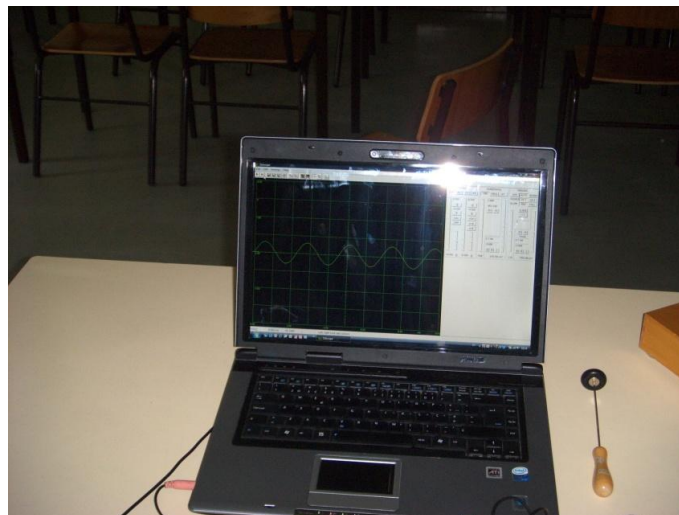
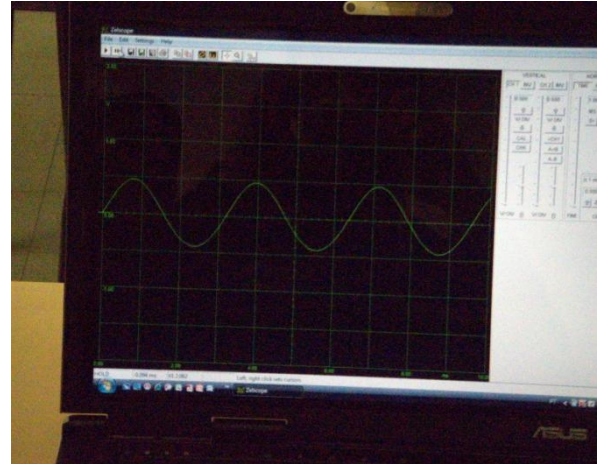
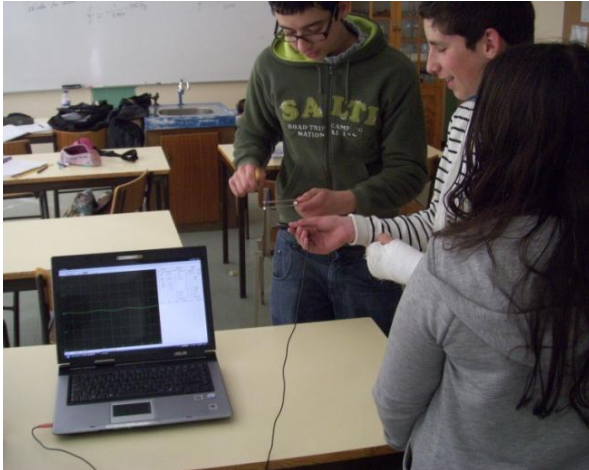


Figura 2.15 - Visualização da onda correspondente à vibração do diapasão.

No ecrã do computador e após estabilização do sinal, pode medir-se um intervalo de tempo a partir da escala horizontal e do botão base de tempo do programa (Time/Div), que indica o tempo que o feixe de electrões demora a percorrer a maior divisão da escala horizontal. Determinando o número de divisões correspondentes a um ciclo completo, pode calcular-se o período da onda, neste caso o valor lido foi de $(2,3 \pm 0,1)$ ms. Utilizando a

expressão 2.2 determina-se a frequência, obtendo-se o valor de $(435 \pm 4\%)$ Hz. O diapasão utilizado tinha gravado na haste a frequência de 442 Hz, pode-se assim concluir que a frequência obtida experimentalmente coincide com o valor da frequência marcada no diapasão se tivermos em conta o erro experimental de 4%.



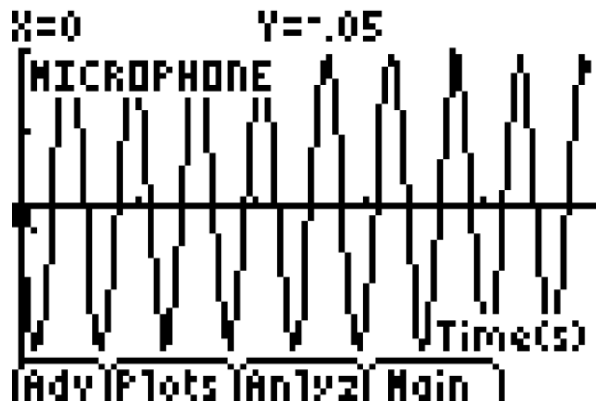
Figuras 2.16, 2.17 - Montagem para determinação do período da onda sonora produzida pelo diapasão e grupo de alunos a efectuar a actividade experimental.

Procedeu-se ainda à determinação da frequência da onda sonora produzida por outro diapasão tendo-se realizado o procedimento que está documentado nas Figuras 2.16 e 2.17. Tendo utilizado a mesma base temporal conclui-se comparando as Figuras 2.17 e 2.15 que o período associado à onda produzida pelo segundo diapasão é maior que o da primeira, o seu valor é de 3,2 ms, logo a frequência será menor. Utilizando a expressão 2.2 obtém-se o valor de $(313 \pm 3\%)$ Hz. O diapasão utilizado tinha gravado na haste a frequência de 320 Hz. Pode-se assim concluir que a frequência obtida experimentalmente concorda com a frequência gravada no diapasão se tivermos em conta o erro experimental de 3%.

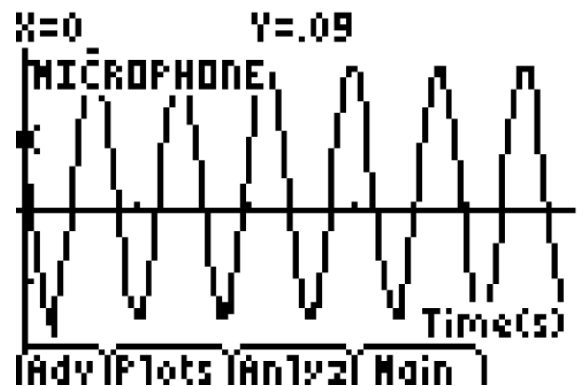
Actividade 2.11

Efectuando a ligação do microfone ao CBL podemos obter uma onda de forma semelhante à da actividade anterior, no ecrã da calculadora gráfica. Fazendo vibrar dois diapasões diferentes, é possível comparar os gráficos obtidos e concluir acerca da igualdade entre a frequência e o número de vibrações por unidade de tempo.

Nas figuras obtidas com o microfone é possível verificar que a onda sonora correspondente ao diapasão de frequência de 440 Hz efectua um maior número de vibrações durante o mesmo tempo comparativamente ao diapasão de 320 Hz. Conclui-se assim, de uma forma natural e significativa, que a frequência será tanto maior quanto maior for o número de ciclos efectuados por unidade de tempo.



Figuras 2.18, 2.19 - Montagem para determinação da onda sonora correspondente ao diapasão de 440 Hz e gráfico correspondente.



Figuras 2.20, 2.21 - Montagem para determinação da onda sonora correspondente ao diapasão de 320 Hz e gráfico correspondente.

Actividade 2.12

O funcionamento do microfone pode ser explicado (de uma forma aproximada) utilizando um tubo de cartão, uma película de plástico, papel de alumínio, um elástico, uma lanterna e um rádio portátil. Efectua-se a montagem da Figura 2.22 e detecta-se o movimento da luz na parede ao “ritmo” da música.



Figura 2.22 - Montagem para simular o funcionamento de um microfone.

O som produzido pelo rádio propaga-se no interior do tubo. A película de plástico é submetida a uma oscilação devido às variações da pressão do ar (como a membrana do microfone). Esta vibração é comunicada à folha de alumínio que se encontra por cima da película (corresponde à bobina do microfone). O movimento do pedaço de alumínio muda a trajectória da luz e a mancha luminosa vibra na parede ao ritmo da música (originando a “conversão” da onda sonora em onda luminosa).

2.4 Determinação da velocidade do som

As primeiras experiências realizadas para determinar a velocidade do som no ar foram efectuadas por Marin Mersenne e Pierre Gassendi no séc. XVI, tendo-se encontrado o valor de 4700 metros por segundo.

Durante o sec. XVII Edmond Halley e Robert Boyle, bem como Giovanni Cassini e Christian Huygens, efectuaram várias experiências sobre a determinação da velocidade do som, mas os resultados obtidos foram bastante contraditórios. A Academia Francesa das Ciências, em 1738, decidiu organizar novas experiências. Dando tiros de canhão à noite (para que as chamas que saíam da boca do canhão fossem visíveis) entre o Observatório de Paris, Montmartre, Fontenay-aux-Roses e Montlhéry, determinou-se o valor de 333 m/s para a velocidade do som à temperatura de 0 ° C. No entanto, estes resultados foram contraditados por uma experiência, em condições semelhantes, realizada na Alemanha.

Em 1822, François Arago e Riche de Prony efectuam novas experiências mais rigorosas. Desta vez utilizam tiros cruzados entre Villejuif e Montlhéry. Os tiros são disparados ao mesmo tempo. Desta forma, os cientistas esperavam diminuir as perturbações devidas à humidade, à velocidade do vento, à pressão e à temperatura, factores que, segundo eles, teriam estado na origem das diferenças entres as experiências precursoras. Para além disso, são utilizados cronómetros mais precisos. As experiências são realizadas nas noites de 21 e 22 de Junho de 1822. Os cálculos efectuados resultam num valor de 330,9 m/s para a temperatura do ar de 0 °C. A base do método consistia em medir o intervalo de tempo que decorria entre a visão do clarão e do fumo associados ao disparo (considerada instantânea) e a audição do estrondo. Este método ainda hoje tem interesse, principalmente nos dias de tempestade: multiplica-se o intervalo de tempo que passa entre o relâmpago e o trovão por 340 m/s (valor da velocidade do som à temperatura de 15° C) para determinar a distância a que estamos do relâmpago.



Figura 2.23 - Montagem para a determinação da velocidade do som no ar (adaptado de Faria, 1995).

A determinação da velocidade do som nalguns sólidos já tinha sido efectuada em 1808 por Jean-Baptiste Biot. Em 1828 Jean-Daniel Colladon e Charles Sturm determinaram a velocidade do som na água do Lago Léman. Golpeando um grande sino debaixo de água,

produzia-se ao mesmo tempo, na superfície, a ignição de uma carga de pólvora. Um observador, usando uma trompa acústica coberta com uma membrana cuja extremidade estava submersa na água, media o intervalo de tempo decorrido entre o momento em que via o fogo da explosão e o momento em que escutava o som do sino.



Figura 2.24 - Montagem para a determinação da velocidade do som na água (adaptado de Faria, 1995).

A velocidade de propagação do som em qualquer meio material pode ser obtida através da relação,

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.3)$$

sendo ρ a massa volúmica do meio e B o módulo de elasticidade volumétrico, definido como

$$B = \frac{-\Delta p}{\Delta V/V} \quad (2.4)$$

Na equação 2.4, $\Delta V/V$ é a variação relativa de volume produzida por uma variação de pressão Δp . Os sinais de Δp e ΔV são sempre opostos, porque quando aumentamos a pressão sobre um elemento (ou seja, Δp é positivo), o volume diminui (ΔV é negativo). O módulo de elasticidade volumétrico está relacionado com a variação de volume de um elemento do meio quando submetido a uma variação da pressão.

A velocidade do som na água à temperatura de 20 °C é de 1482 m/s e no ar à mesma temperatura tem o valor de 343 m/s. A massa volúmica da água é quase 1000 vezes maior que a do ar. Se o único factor fosse a diferença de massa volúmica, de acordo com a equação 2.3 era previsível que a velocidade do som na água fosse muito menor que a velocidade do som no ar. Concluímos assim, de acordo com a equação 2.3, que o módulo de elasticidade volumétrico da água é mais de 1000 vezes superior que o do ar, ou o que é equivalente, a água é muito mais incompressível do que o ar.

Actividade 2.13

Pode determinar-se a velocidade do som no ar medindo o intervalo de tempo que decorre entre a produção de um som e o momento em que se ouve o eco. Sabendo a distância entre o local onde se produz o som e o local onde se reflecte o som, é fácil calcular a velocidade do som a partir da relação:

$$\text{velocidade} = \frac{\text{comprimento do percurso percorrido pelo som}}{\text{tempo que o som demora a percorrer o percurso}} \quad (2.5)$$

Nesta actividade utiliza-se um tubo com 1,18 m, uma calculadora gráfica TI, o interface CBL 2, uma fita métrica, um sensor de temperatura e um microfone Vernier. O objectivo do trabalho é medir o intervalo de tempo que o som demora a percorrer o trajecto de ida e volta no tubo. Na actividade obtiveram-se os gráficos das Figuras 2.26 e 2.27, onde é possível identificar dois picos bem destacados, o primeiro (correspondente ao instante 0,0026s) é o som inicial e o segundo (correspondente ao instante 0,0095 s) é a sua reflexão.



Figura 2.25 - Montagem para a determinação da velocidade do som no ar.



Figura 2.26 - Identificação do pico correspondente ao som inicial.



Figura 2.27 - Identificação do pico correspondente ao reflexo do som inicial.

O som no intervalo de tempo 0,0069 s percorreu a distância de 2,36 m, correspondente ao percurso de ida e volta no interior do tubo. Utilizando a expressão 2.5 determina-se o valor de 342 m/s para a velocidade do som à temperatura de 18 °C.

Num gás, B pode ser determinado pela expressão

$$B = \gamma \cdot p \quad (2.6)$$

onde γ é o coeficiente adiabático e p a pressão.

Assim, para um gás, a velocidade do som, substituindo B na equação 2.3, pode ser calculada através da expressão

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (2.7)$$

usando a equação dos gases ideais podemos escrever

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad (2.8)$$

onde T corresponde à temperatura absoluta, M é a massa molar do gás e γ e R são constantes para um determinado gás. Para o ar, $M = 2,88 \times 10^{-2} \text{ kg mol}^{-1}$, $R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e $\gamma = 1,4$. Assim para a temperatura de 18 °C (291 K) e substituindo os restantes parâmetros na equação 2.8 obtém-se o valor de 343 m/s. Pode-se concluir que o valor obtido experimentalmente coincide com o valor tabelado.

Actividade 2.14

Em muitas situações existe a passagem de duas ou mais ondas simultaneamente na mesma zona do espaço. Por exemplo, quando ouvimos um concerto ao vivo, as ondas sonoras produzidas pelos diferentes instrumentos chegam simultaneamente aos nossos ouvidos. Neste caso a onda resultante, ou onda total, será igual à soma algébrica das diferentes ondas:

$$y_{resultante}(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) + \dots \quad (2.9)$$

Quando duas ondas sinusoidais com o mesmo comprimento de onda e a mesma amplitude se propagam em sentidos opostos, a onda resultante pode ser obtida utilizando o princípio da sobreposição, ou seja, a onda total é igual à soma das duas ondas e estas ondas não se afectam mutuamente. Esta situação pode ser ilustrada na Figura 2.28. Na Figura 2.28a, está representada uma onda que se propaga para a esquerda e na Figura 2.28b, uma onda que se propaga para a direita. Na Figura 2.28c está representada a soma algébrica das duas ondas. Como se pode verificar existem pontos na onda resultante que permanecem imóveis, são denominados nodos. No ponto intermédio entre dois nodos sucessivos estão anti-nodos, pontos em que a amplitude da onda resultante é máxima.

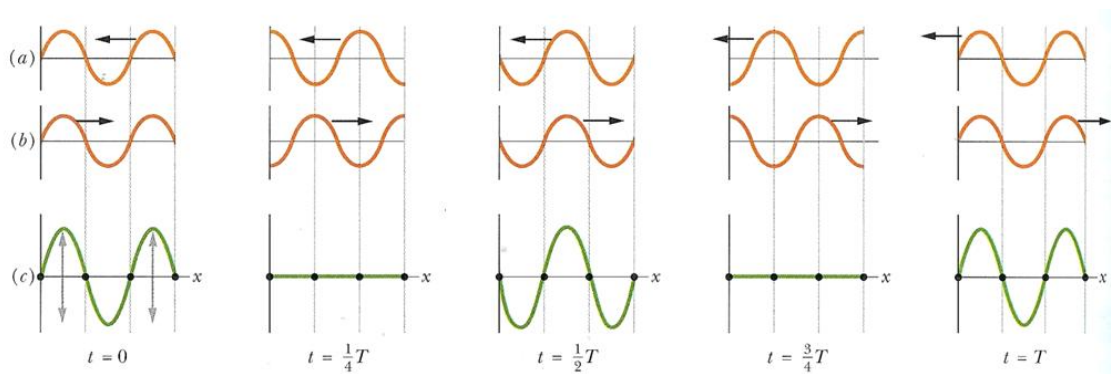


Figura 2.28 - (a) Cinco instantes correspondentes a uma onda que se propaga para a esquerda. (b) Cinco instantes correspondentes a uma onda que se propaga para a direita. (c) Instantes correspondentes à sobreposição das duas ondas (adaptado de Halliday, 2009).

Estas ondas são designadas como ondas estacionárias, porque a forma da onda não se move nem para a esquerda, nem para a direita. As posições dos nodos e anti-nodos não variam com o tempo. Esta análise pode ser feita se considerarmos as equações que representam as ondas:

$$y_1 = y_m \text{ sen } (kx - \omega t) \quad (2.10)$$

$$y_2 = y_m \text{ sen } (kx + \omega t) \quad (2.11)$$

onde k representa o número de onda, ou seja, $\frac{2\pi}{\lambda}$, ω , representa a frequência angular, ou seja, $\frac{2\pi}{T}$, e $kx \pm \omega t$ é a fase da onda.

De acordo com o princípio da sobreposição, a onda resultante pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$y_{\text{resultante}} = y_m \text{sen}(kx - \omega t) + y_m \text{sen}(kx + \omega t) \quad (2.12)$$

Que pode ser reescrita na forma de:

$$y_{\text{resultante}} = [2y_m \text{sen}(kx)] \cos(\omega t) \quad (2.13)$$

Esta equação representa uma onda estacionária. O factor $2y_m \text{sen}(kx)$ pode ser visto como a amplitude da onda e, ao contrário de uma onda progressiva, onde é constante, na onda estacionária varia com a posição. No caso da onda representada pela equação 2.13 a amplitude é zero para valores de kx para os quais $\text{sen}(kx) = 0$. Os nodos são então determinados pela equação:

$$kx = n\pi \quad \text{para } n = 0,1,2,\dots \quad (2.14)$$

Utilizando $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ nesta equação, obtemos:

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{para } n = 0,1,2,\dots \quad (2.15)$$

para as posições de amplitude zero (nodos) da onda estacionária. Podemos ainda concluir que os nodos sucessivos se encontram separados pela distância correspondente a $\frac{\lambda}{2}$, ou seja, metade do comprimento de onda.

A amplitude máxima da onda estacionária é de $2y_m$, que ocorre para valores de kx , para os quais $|\text{sen}(kx)| = 1$. Esses valores são

$$kx = \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots \quad (2.16)$$

$$kx = (n + \frac{1}{2})\pi \quad \text{para } n = 0,1,2,\dots \quad (2.17)$$

utilizando $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ nesta equação, obtemos:

$$x = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2} \quad \text{para } n = 0,1,2,\dots \quad (2.18)$$

para os anti-nodos da onda estacionária. Conclui-se também que os anti-nodos sucessivos estão separados pela distância correspondente a meio comprimento de onda, $\frac{\lambda}{2}$.

Quando uma fonte sonora (diapasão, altifalante ou gerador de sinais) vibra perto de um tubo fechado numa extremidade, pode produzir (dependendo do tipo de vibração) uma onda sonora que se propaga no interior do tubo. Quando chega à extremidade fechada a onda é reflectida e vai encontrar uma onda emitida pela fonte sonora que se propaga no sentido contrário. Esta, por sua vez, quando chegar à extremidade fechada é reflectida e vai encontrar uma nova onda e assim vamos obter várias ondas sobrepostas que vão interferir entre si.

Para certas frequências, a interferência produz uma onda estacionária com nodos e grandes anti-nodos. Neste caso dizemos que a onda estacionária é gerada por ressonância e as frequências que provocam esta onda são denominadas frequências de ressonância. Quando a fonte emite frequências que não são as de ressonância, a interferência das ondas resulta num padrão de interferência em que há cancelamento parcial das ondas, ou seja, as oscilações no meio vibrante serão de pequena amplitude.

No caso de um tubo fechado, uma extremidade aberta corresponde a um anti-nodo e uma extremidade fechada corresponde a um nodo.

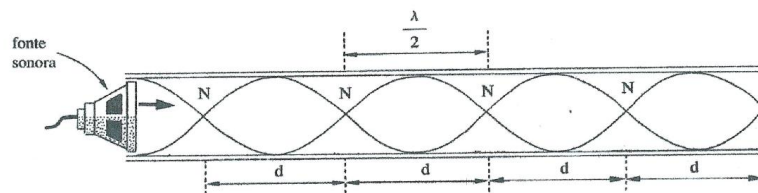


Figura 2.29 - Onda estacionária formada no interior de um tubo quando na extremidade se produz uma onda sonora (adaptado de Faria, 1995).

As condições para que possa ocorrer ressonância pode ser compreendida utilizando o comprimento de onda associado à fonte sonora. Os estados de ressonância para um tubo fechado ocorrem quando o comprimento de onda, λ , satisfaz a seguinte condição:

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad n = 1,3,5,7,\dots \quad (2.19)$$

onde L representa o comprimento do tubo.

As frequências de ressonância que correspondem a esses comprimentos de onda podem ser calculadas pela expressão:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{4L} \quad \text{para } n = 1,3,5,7,\dots \quad (2.20)$$

A menor frequência é denominada de primeiro harmónico e, neste caso, os números dos harmónicos são sempre ímpares e são designados como terceiro harmónico, quinto harmónico e assim sucessivamente.

Conhecendo-se o comprimento de onda das ondas sonoras e respectiva frequência de ressonância, a velocidade de propagação do som no ar pode ser determinada pela expressão:

$$v_{som} = \lambda \cdot f \quad (2.21)$$

Na actividade utiliza-se um diapasão de frequência 440 Hz e vários tubos de vidro onde se coloca água a diferentes alturas. Quando se percute, o diapasão vibra e o ar, em volta, vibra com a mesma frequência. Assim, quando se aproxima o diapasão da abertura do tubo onde existe a coluna de ar, as moléculas constituintes do ar entram em vibração. Numa onda estacionária, à superfície da água contida no tubo, forma-se um nodo (a vibração é nula). Na abertura do tubo, forma-se um anti-nodo (a vibração tem amplitude máxima). Neste caso ocorre ressonância. Este aumento da intensidade detecta-se quando o diapasão passa de um lado para outro sobre a abertura do tubo. Determina-se o comprimento da coluna de ar para o qual ocorre a primeira ressonância, esse comprimento corresponde a $\frac{\lambda}{4}$ (Figura 2.29 e equação 2.19). Nesta actividade, obteve-se o valor de 0,19 m para o comprimento da coluna de ar correspondente à primeira ressonância. Assim, o comprimento de onda obtido experimentalmente é igual a 0,76 m. Utilizando a equação 2.21 determina-se que a velocidade do som no ar (à temperatura de 18 ° C) é igual a 334 m/s. Comparando com o valor tabelado, conclui-se que o erro relativo é de 2,7%. Este erro pode ser atribuído à pouca precisão do material utilizado e à dificuldade da determinação do comprimento da coluna de ar ao qual corresponde a ressonância.

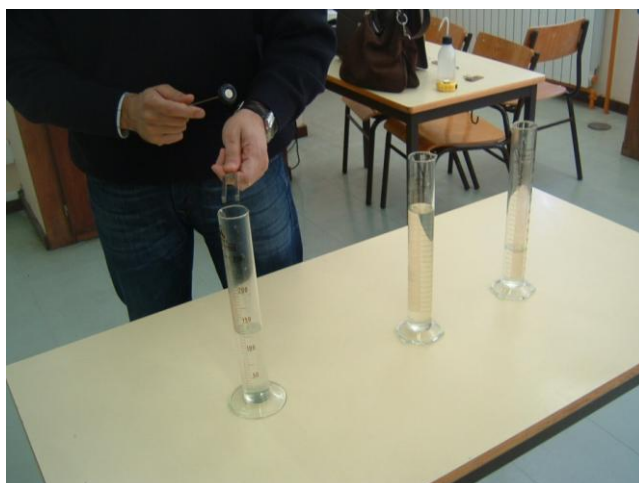


Figura 2.30 - Montagem para a determinação do comprimento da coluna de ar para o qual ocorre a primeira ressonância.

Actividade 2.15

A melhor propagação do som nos sólidos pode ser demonstrada realizando uma actividade que envolve dois alunos e uma mesa. O primeiro aluno dá uma pancada na mesa e o segundo ouve o som produzido através do ar. De seguida, o aluno que ouviu o som, encosta o ouvido à mesa e o primeiro volta a dar uma pancada com a mesma intensidade da primeira. Desta vez o som ouvido é mais intenso, porque foi transmitido ao longo do sólido.



Figuras 2.31, 2.32 - Verificação que o som se propaga melhor nos sólidos comparativamente ao ar.

Actividade 2.16

A propagação do som através dos sólidos pode ainda ser evidenciada através de um telefone de cordel. Para o construir são necessárias duas latas (ou copos de iogurte vazios) e fio ou cordel. Com um prego fura-se o centro da lata e o fio atravessa esse furo. De seguida, dá-se um nó no fio que ficou no interior da lata para que não se solte. O telefone está agora pronto a funcionar, basta para isso esticar o fio e um dos alunos falar para dentro de uma das latas e o outro colega tentar ouvir na outra lata. No ar, o som propaga-se em todas as direcções e perde rapidamente intensidade. Basta afastarmo-nos de alguém para que a conversa se torne inaudível. No caso de um fio tenso, o som propaga-se numa direcção e ao longo de uma maior distância. Consegue-se transmitir uma conversa a distâncias consideráveis. No caso de o fio estar bem esticado (elevada tensão), consegue-se transmitir uma conversa a cerca de 25 metros. Deve-se ter ainda o cuidado do fio não tocar em nada para que não exista atenuação do sinal sonoro.



Figura 2.33 - Telefone de cordel construído pelos alunos.

Actividade 2.17

Na actividade 2.14 ao utilizar um diapasão com a frequência de 440 Hz determina-se teoricamente que os comprimentos do tubo para os quais ocorre ressonância são de 19 cm, 58 cm e 96,7 cm. Se a fonte sonora possuísse uma frequência maior, obteríamos ondas estacionárias em tubos com menor comprimento. Nesta actividade utiliza-se um apito de futebol, um tubo de ensaio com cerca de 15 cm, serradura e uma régua.

A determinação do comprimento de onda pode ser feita utilizando a montagem da Figura 2.34 e considerando que no interior do tubo vai ser possível identificar os nodos com os locais onde a serradura está depositada e os anti-nodos com os locais onde a serradura está em vibração. Utilizando a equação 2.19 que permite relacionar o comprimento de onda com metade da distância entre dois nodos, é possível calcular os valores de λ associados a ondas estacionárias. No caso da actividade realizada, a distância entre dois nodos consecutivos é de 6,6 cm e o λ tem o valor de 13,2 cm.



Figura 2.34 - Montagem para a determinação da distância entre dois nodos consecutivos.

A determinação da frequência fundamental do apito foi feita utilizando o programa zelscope, tendo-se obtido o gráfico da figura 2.35. Foi possível determinar que a frequência fundamental do apito utilizado é de 2583 Hz.

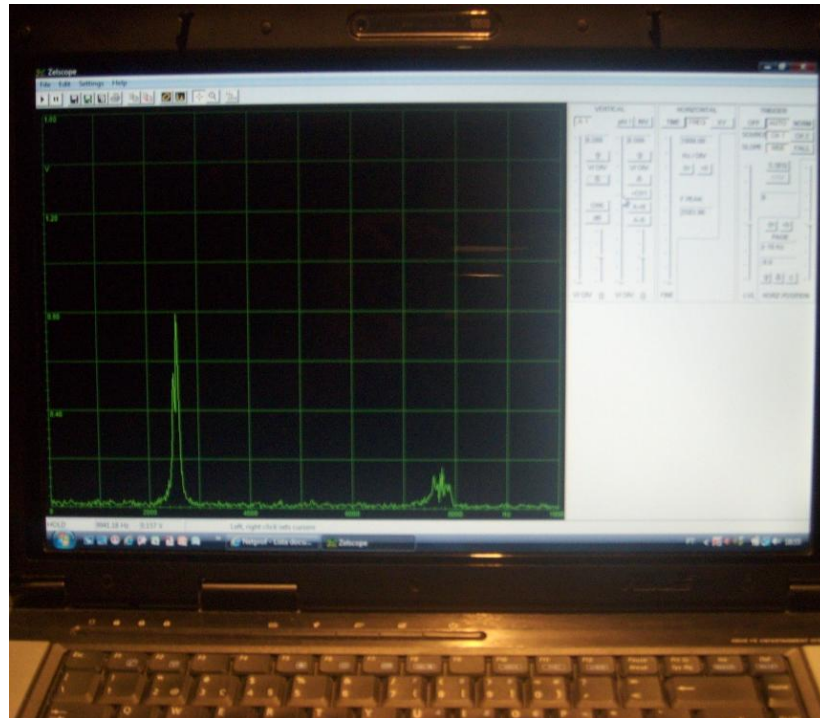


Figura 2.35 - Gráfico correspondente à determinação da frequência sonora do apito.

A velocidade de propagação do som no ar (à temperatura de 18 °C) foi determinada utilizando a equação 2.21. O valor calculado foi de 341 m/s, valor que se encontra muito próximo do valor tabelado.

2.5 Atributos do som

Os sons podem ser distinguidos pelos seus atributos (características): altura, intensidade e timbre.

Actividade 2.18

A altura permite distinguir os sons agudos dos sons graves. Este atributo é determinado pela frequência da onda sonora. Os sons agudos (altos) possuem frequências elevadas, os sons graves (baixos) possuem frequências reduzidas. Nesta actividade, varia-se a altura do som produzido por cordas de pesca controlando diferentes variáveis. A análise pode ser feita considerando que a velocidade da onda numa corda esticada pode ser obtida utilizando a equação (Lei de Taylor):

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2.22)$$

onde T corresponde à tensão da corda e μ é a densidade linear de massa e é igual à razão entre a massa total da corda, m , e o seu comprimento l . Assim, $\mu = \frac{m}{l}$.

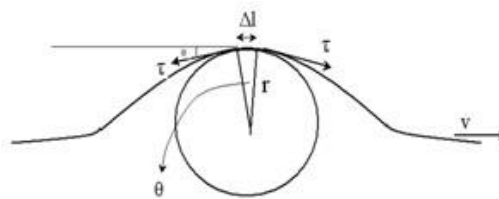


Figura 2.36 - Pulso estacionário numa corda que se move para a direita.

A equação 2.22 pode ser deduzida considerando um pulso como o da Figura 2.36 que se propaga numa corda da esquerda para a direita com velocidade v . Considerando um pequeno elemento da corda com comprimento Δl formando um arco de círculo de raio r , uma força \vec{T} de módulo igual à tensão da corda puxa este elemento nas duas extremidades. As componentes dessas forças na direcção da corda anulam-se, mas as componentes na direcção perpendicular à corda têm como resultado uma força resultante, cujo módulo pode ser determinado pela expressão:

$$F_r = 2 (T \sin \theta) \approx T (2\theta) = T \frac{\Delta l}{r} \quad (2.23)$$

considerou-se $\sin \theta \approx \theta$, uma vez que os valores que o ângulo θ pode assumir são de pequena amplitude e com base na figura 2.36, $2\theta = \frac{\Delta l}{r}$. A massa do elemento pode ser determinada pela expressão:

$$\Delta m = \mu \Delta l \quad (2.24)$$

No instante representado na figura o elemento de corda Δl forma um arco de círculo. Assim, a expressão da 2ª Lei de Newton, considerando $a = \frac{v^2}{R}$, assume a forma:

$$T \frac{\Delta l}{r} = (\mu \Delta l) \frac{v^2}{r} \quad (2.25)$$

Resolvendo a equação e explicitando a velocidade v obtemos a equação 2.22.

Na Figura 2.37 comparam-se dois sons produzidos por duas cordas de diferentes espessuras, sujeitas à mesma tensão e com o mesmo comprimento da parte livre (neste caso a parte da corda entre os dois tubos de ensaio). Verifica-se que a corda mais espessa produz um som mais grave, tal pode ser explicado pelo facto de executar menos vibrações num segundo (possui uma maior densidade de massa e portanto uma menor velocidade de propagação, de acordo com a equação 2.22) do que a corda mais fina.

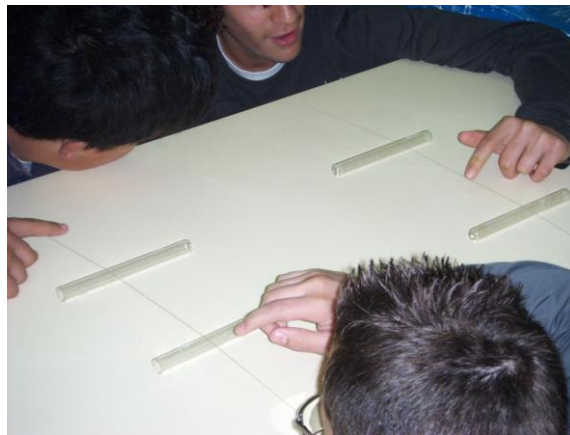


Figura 2.37 - Comparação das características do som produzido por cordas de diferentes espessuras.

Nas Figuras 2.38 e 2.39 comparam-se dois sons produzidos pela mesma corda em duas situações em que a parte livre é diferente. Verifica-se que quanto mais curta for a parte livre, mais agudo é o som produzido porque a frequência é maior. As ondas estacionárias produzidas têm menor comprimento de onda na corda menos comprida.



Figuras 2.38 e 2.39 - Comparação das características do som produzido alterando a parte livre da corda.

Esta variação ocorre porque numa corda de comprimento L , com as duas extremidades fixas, podem ser produzidas ondas estacionárias. No harmónico fundamental (isto é, a onda estacionária com a menor frequência e o maior comprimento de onda), a corda vibra como mostra a Figura 2.40. Neste caso, o comprimento de onda, λ , é o dobro do comprimento da corda. Assim, a frequência é $f_1 = \frac{v}{2L}$. No segundo harmónico, como mostra a Figura 2.40, o comprimento de onda é igual ao comprimento da corda, assim, $f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$. Analisando os harmónicos superiores concluímos que possuem frequências $3f_1, 4f_1, \text{etc.}$ A frequência do harmónico n será

$$f_n = n \frac{v}{2L} = nf_1. \quad (2.26)$$

Substituindo a velocidade, v , definida pela equação 2.22, obtemos a expressão que permite determinar a frequência dos harmónicos numa corda

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (2.27)$$

Analisando a equação 2.27, concluímos que quanto menor for o comprimento da corda, L , maior será a frequência (menor o comprimento de onda) da onda produzida.

A frequência da corda podia ainda ser alterada esticando mais ou menos a corda. Nesse caso variaríamos a tensão da corda e quanto maior a tensão, mais agudo seria o som produzido porque a velocidade de propagação da onda seria maior, de acordo com a equação 2.22.

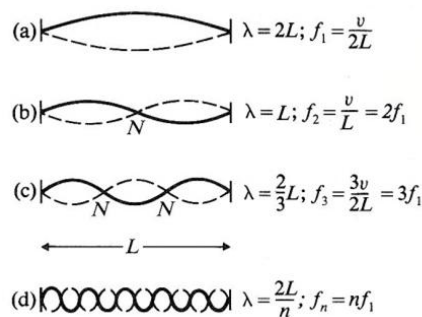


Figura 2.40 - Harmónicos numa corda vibrante (adaptado de Rossing, 1989)

Actividade 2.19

Nos instrumentos de sopro, o som produzido depende dos diferentes comprimentos das colunas de ar contidas nos tubos. Esta dependência pode ser demonstrada utilizando tubos de ensaio com água a diferentes alturas (Figura 2.42). Os alunos sopram no tubo (Figura 2.41) e verificam que quanto menor for o comprimento da coluna de ar, mais agudo é o som produzido. Esta maior altura do som produzido justifica-se pelo facto da frequência de

ressonância das ondas ser maior nos tubos com menos ar (menor L), de acordo com a equação 2.20.



Figura 2.41 - Aluno que sopra num tubo de ensaio com água.

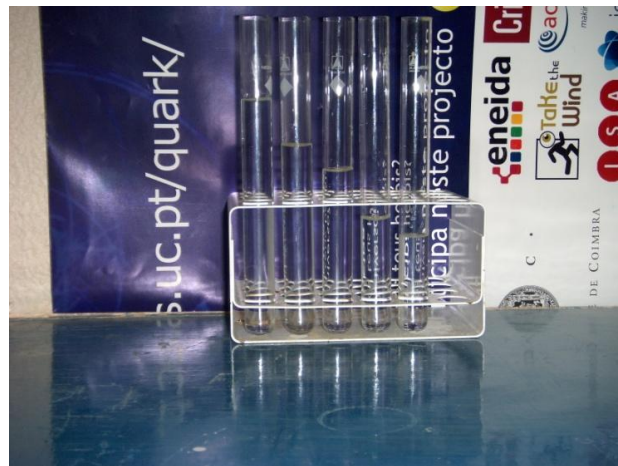


Figura 2.42 - Tubos de ensaio com água a diferentes alturas.

Actividade 2.20

Em acústica, a intensidade de uma onda sonora é igual à potência média por unidade de área perpendicular à direcção de propagação e permite distinguir um som forte de um som fraco.

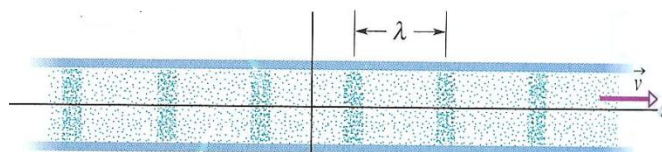


Figura 2.43 - Onda sonora que se propaga com velocidade v num tubo cheio de ar (adaptado de Halliday, 2008).

Se considerarmos, na Figura 2.43, uma camada fina de ar de espessura dx , área A e massa dm , que efectua uma oscilação para à frente e para trás associada à onda sonora de equação $y=y_m \sin(kx - \omega t)$ que passa por ela, a energia cinética dE_c dessa camada de ar será

$$dE_c = \frac{1}{2} dm v_s^2 \quad (2.28)$$

onde v_s é a velocidade de oscilação do elemento de ar e pode ser obtida a partir da equação

$$v_s = \frac{\partial s}{\partial t} = \omega y_m \cos(kx - \omega t). \quad (2.29)$$

Utilizando esta relação e considerando que $dm = \rho A dx$, podemos escrever

$$dE_c = \frac{1}{2} (\rho A dx) (\omega y_m)^2 \cos^2(kx - \omega t). \quad (2.30)$$

Dividindo a equação 2.30 por dt , obtém-se a taxa com a qual a energia cinética se desloca com a onda. Considerando que $\frac{dx}{dt}$ é a velocidade, v , de propagação da onda, podemos escrever

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v \omega^2 y_m^2 \cos^2(kx - \omega t). \quad (2.31)$$

A taxa média, considerando que o valor médio do quadrado de uma função co-seno para uma oscilação completa é $\frac{1}{2}$, é igual a

$$\left(\frac{dE_c}{dt}\right)_{\text{méd}} = \frac{1}{4} \rho A v \omega^2 y_m^2 \quad (2.32)$$

Supondo que a onda transporta energia potencial associada à variação de comprimento local da corda com a mesma taxa média (o elemento dx executa um movimento harmónico simples na direcção x), podemos calcular a intensidade da densidade de corrente de energia da onda pela equação

$$I = \frac{2 \left(\frac{dE_c}{dt}\right)_{\text{méd}}}{A} = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 y_m^2 \quad (2.33)$$

A dependência da intensidade com a amplitude (y_m) pode ser posta em evidência utilizando uma viola e afastando a corda da sua posição de equilíbrio (Figuras 2.44 e 2.45). Quanto mais afastarmos a corda, maior amplitude, maior será a força aplicada na corda e maior a quantidade de energia transferida para a corda. Desta forma, o som produzido será mais forte.



Figura 2.44 - Grande afastamento da posição de equilíbrio de uma corda numa viola.



Figura 2.45 - Pequeno afastamento da posição de equilíbrio de uma corda na viola.

A relação entre a intensidade do som e a amplitude (y_m) pode ainda ser demonstrada percutindo um diapasão e obtendo duas imagens, a primeira (Figura 2.46) quando o som é facilmente audível (som forte) e a segunda (Figura 2.47) quando o som é praticamente inaudível (som fraco).

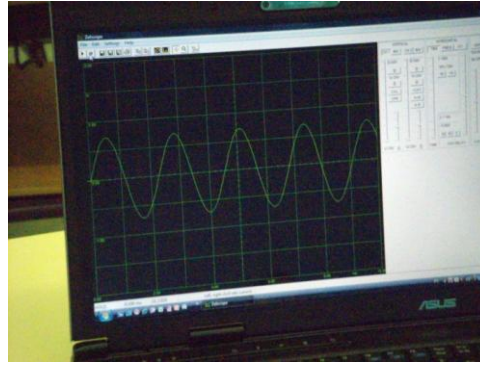


Figura 2.46 - Som forte proveniente de um diapasão.

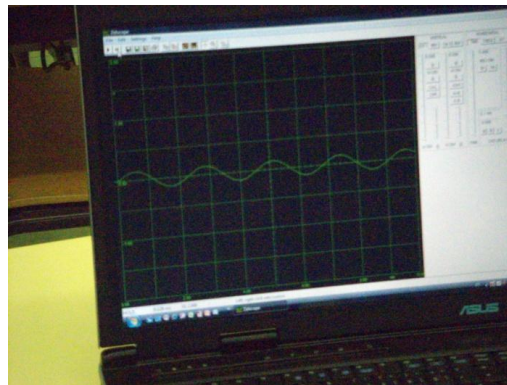


Figura 2.47 - Som fraco proveniente de um diapasão.

Actividade 2.21

Nesta actividade pretende-se demonstrar que as perturbações sonoras podem ser concentradas numa pequena região, aumentando a sua intensidade. Os materiais utilizados são um copo de plástico e um elástico. Estica-se o elástico à volta do copo e coloca-se o fundo do copo encostado ao ouvido (Figura 2.48). Em seguida dedilha-se o elástico esticado e ouve-se um som estrondoso pelo facto do plástico transmitir as vibrações ao ouvido. Depois afasta-se o copo do ouvido e dedilha-se novamente o elástico (Figura 2.49) e o som agora ouvido é mais fraco. Conclui-se, assim, que a densidade de energia sonora é muito maior no interior do copo.



Figuras 2.48,2.49 - Verificação da maior densidade de energia no interior de um copo e da perda de energia do som quando se propaga no ar.

Actividade 2.22

Dois instrumentos podem emitir a mesma nota com a mesma altura e ser possível distinguir se essa nota provém, por exemplo, de um violino ou de um trompete. O atributo do som que permite fazer essa distinção é o timbre. Esta característica do som permite distinguir dois sons com a mesma altura e a mesma intensidade. Embora a nota produzida pelos dois instrumentos possua a mesma frequência fundamental (a mais grave), cada um deles emite outras frequências que são múltiplas da fundamental (hamónicos) e cujas intensidades relativas e número dependem do instrumento e da forma como é tocado. Fourier demonstrou, por análise matemática, que um fenómeno periódico se poderia decompor numa soma de funções sinusoidais elementares (harmónicos), cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência mais grave denominada fundamental. Por exemplo, um som com uma frequência fundamental de 60 Hz, possuirá na sua composição a série completa de múltiplos (60, 120, 180, 240 Hz, etc.) ou só algumas destas frequências, exceptuando qualquer outro valor que não seja múltiplo da frequência do harmónico fundamental, por exemplo 82 Hz.

Desta forma, e comparando os dois sons provenientes do violino e do trompete, embora possuam a mesma frequência fundamental, cada um dos instrumentos musicais emite outras frequências que são múltiplas da fundamental (hamónicos) e cujas intensidades relativas e número dependem do instrumento e da forma como é tocado.

Na Figura 2.50 está identificada a nota lá₃ (440 Hz) produzida pelo diapasão, sendo possível verificar que esta onda possui uma única frequência (som puro).

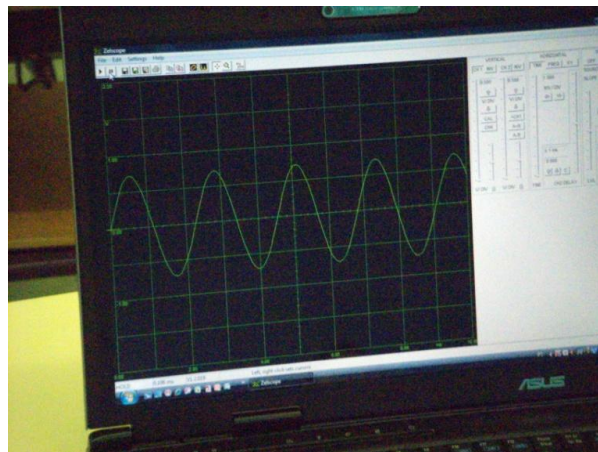


Figura 2.50 - Gráfico correspondente à nota musical lá₃ produzida por um diapasão.

Na Figura 2.52 está a onda correspondente à mesma nota lá₃ (frequência fundamental de 440 Hz) produzida por um trompete (Figura 2.51), obtida com o programa zelscope e na Figura 2.53 está representada informação (frequência e intensidade) dos harmónicos associados ao som produzido pelo trompete, obtidos com o mesmo programa.



Figura 2.51 - Aluno que produz a nota musical lá₃ num trompete.

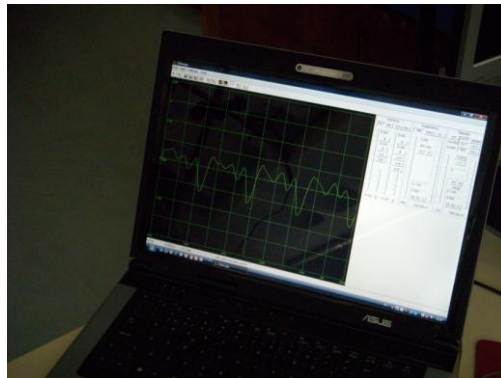


Figura 2.52 - Gráfico correspondente à nota musical lá₃ produzida por um trompete.



Figura 2.53 - Valores das frequências dos harmônico correspondentes à nota musical lá₃ produzida por um trompete.

Na Figura 2.55 está a onda correspondente à mesma nota lá₃ (frequência fundamental de 440 Hz) produzida por um violino (Figura 2.54), obtida com o programa zelscope e na Figura 2.56 está representada informação (frequência e intensidade) dos harmônicos associados ao som produzido pelo violino, obtidos com o mesmo programa.



Figura 2.54 - Aluna que produz a nota musical lá₃ num violino.

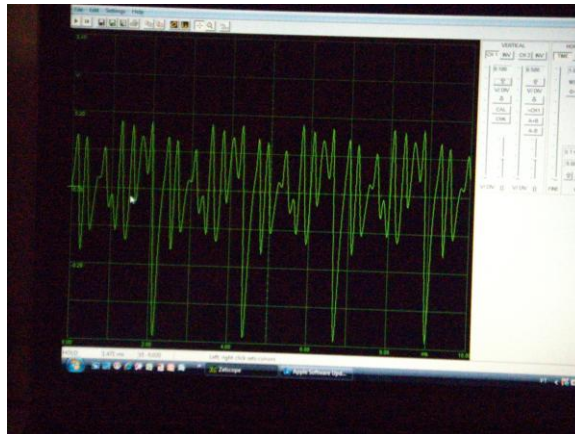


Figura 2.55 - Gráfico correspondente à nota musical lá₃ produzida por um violino.

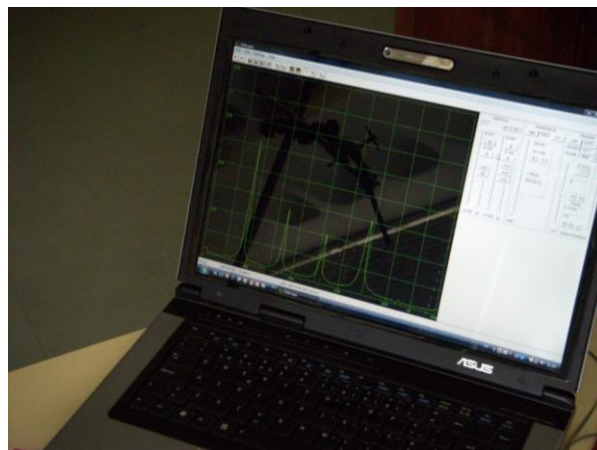


Figura 2.56 - Valores das frequências dos harmônicos correspondentes à nota musical lá₃ produzida por um violino.

Verifica-se que a onda associada ao som produzido pelo trompete e pelo violino são o resultado da sobreposição de várias ondas (som complexo). É ainda possível verificar que o som correspondente ao violino possui um maior número de harmônicos comparativamente ao som do trompete.

2.6 Propriedades das ondas sonoras

As ondas sonoras, à semelhança das ondas electromagnéticas, podem ser representadas por um raio de onda. Este raio de onda corresponde à direcção de propagação da energia. Quando o meio de propagação é homogéneo, esta propagação é feita em linha recta e o raio é rectilíneo. O “raio sonoro” corresponde à direcção de propagação da energia sonora, tal como o “raio luminoso” corresponde à direcção de propagação da energia luminosa, definida pelo vector de Poynting.

A representação de uma onda usando o “raio” está associada à representação usando ondas, ou superfícies chamadas frentes de onda. Desta forma, quando representamos frentes de onda, o raio de onda é perpendicular à superfície de onda (Figura 2.57) e indica a direcção de propagação das ondas sonoras. As propriedades das ondas sonoras vão ser analisadas utilizando a representação que faz uso do “raio sonoro”.

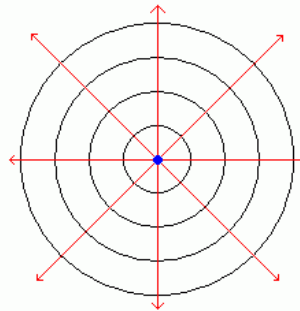


Figura 2.57- Frentes de onda (a preto) e raios (a vermelho) no caso particular de uma onda esférica emitida por uma fonte pontual sonora (adaptado de <http://culturesciencephysique.ens-lyon.fr>).

As ondas sonoras quando encontram um obstáculo podem mudar a direcção, ou pelo menos o sentido, da sua propagação. Este fenómeno designa-se por reflexão e será mais significativo se as superfícies onde a onda sonora incide forem duras e polidas (boas reflectoras) e menos significativo se as suas superfícies forem macias e felpudas (maus reflectores).

Na Figura 2.58 representa-se uma onda sonora plana que incide numa superfície sendo reflectida e mudando a sua direcção de propagação.

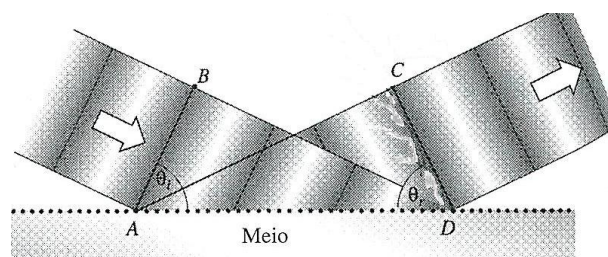


Figura 2.58 - Onda sonora plana que incide numa superfície sofrendo reflexão.

A linha \overline{AB} é paralela às frentes de onda incidentes, e a linha \overline{CD} às frentes de onda reflectidas, ou seja, por reflexão \overline{AB} transforma-se em \overline{CD} . Para que todas as ondas emitidas pelos centros de dispersão à superfície se sobreponham em fase e constituam uma onda plana reflectida única a distância \overline{AB} terá que ser igual a \overline{CD} . Como os dois triângulos têm uma hipotenusa comum,

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\overline{BD}} = \frac{\text{sen } \theta_r}{\overline{AC}}. \quad (2.35)$$

todas as ondas se propagam no meio de incidência com a mesma velocidade v_i . Assim, o tempo (Δt) necessário para que o ponto B, sobre uma frente de onda, atinja D é igual ao intervalo de tempo que a onda emitida por A atinja C, logo $\overline{BD} = v_i \Delta t = \overline{CD}$. Fazendo uso desta igualdade na equação 2.35, concluímos que $\text{sen } \theta_i = \text{sen } \theta_r$, o que significa que $\theta_i = \theta_r$. Conclui-se, assim, que o ângulo de incidência (θ_i) é igual ao ângulo de reflexão (θ_r), o que traduz parte da primeira lei da reflexão. A lei da reflexão estabelece ainda que o raio incidente, o raio reflectido e a normal à superfície pertencem todos ao mesmo plano.

Actividade 2.23

Coloca-se uma placa de cartão duro sobre a mesa em posição vertical e um tubo de cartão (ou PVC) fazendo um certo ângulo com a placa, como mostra a Figura 2.59, tendo o cuidado de deixar um espaço entre o tubo e placa. Na extremidade do tubo é colocada a fonte sonora (por exemplo um relógio de corda). Com a ajuda de um segundo tubo, tenta-se ouvir o som proveniente da fonte e que é reflectido pelo obstáculo. Quando se detectar esse som, mede-se o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão. Pode-se repetir a experiência para diferentes valores de ângulos de incidência e substituir o cartão duro por outros obstáculos e concluir sobre a maior ou menor absorção das ondas sonoras pelas diferentes superfícies.



Figura 2.59 - Montagem para verificar a reflexão de ondas sonoras.

Actividade 2.24

Nesta actividade coloca-se um relógio no interior de um tubo e afastamo-nos para que não consigamos ouvir o seu som. De seguida, posiciona-se um espelho (ou uma superfície metálica) sobre o tubo de vidro e inclina-se até que o som seja ouvido nitidamente. Conclui-se assim que o som é reflectido na superfície colocada por cima do tubo.

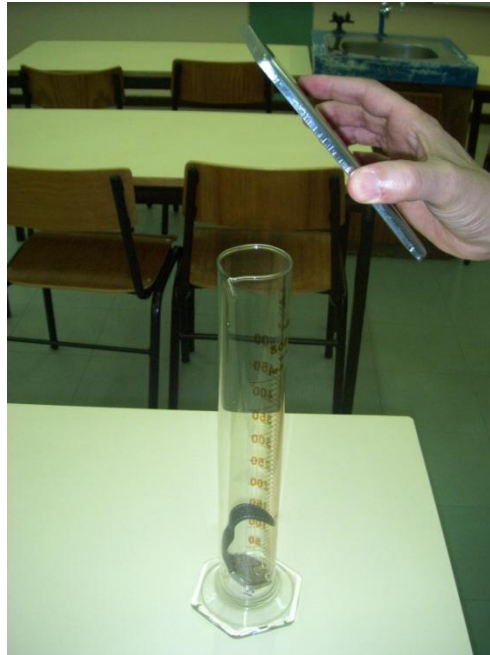


Figura 2.60 - Montagem para a verificação da reflexão das ondas sonoras.

Nas duas actividades realizadas verifica-se que o som se reflecte quando encontra um obstáculo. Se esse obstáculo estiver convenientemente colocado, pode acontecer que o som se reflecta na mesma direcção mas em sentido contrário. Ouvimos, então, o mesmo som pela segunda vez, este som reflectido é o eco.

Para ouvirmos um eco é necessário (à temperatura de 15 °C) que o obstáculo esteja pelo menos a 17 metros de nós, neste caso o som percorre 34 m. Como à temperatura de 15°C a velocidade do som é de 340 m/s o som leva um décimo de segundo para percorrer 34 metros. Se a distância for menor o som gastará menos tempo a percorrer essa distância, e os nossos ouvidos não conseguirão distinguir o som do seu eco.

Nas salas de concertos o eco tem de ser evitado. Nesse caso a sala tem que ter dimensões adequadas, uma arquitectura apropriada e uma decoração interior adequada para que a reflexão das ondas sonoras se faça de modo a originar, em tempo adequado, o prolongamento do som original, de modo que ele não se distinga do seu eco. Este fenómeno é designado por reverberação.

Actividade 2.25

Os alunos determinam a profundidade da água utilizando os dados obtidos com um detector de ecos ultra-sónicos (sonar). Num exemplo, o sonar mediu um intervalo de tempo de 0,5 segundos entre o som emitido e o som reflectido e a velocidade do som na água (à temperatura a que foi realizada a medição) é de 1500 m/s. A profundidade da água pode ser determinada utilizando a expressão $d = v \times \Delta t$ (onde v é a velocidade de propagação da onda, d a distância percorrida pela onda e Δt o tempo gasto a percorrer essa distância). Neste caso obtém-se o valor de 750 m para a distância percorrida e conclui-se que a profundidade da água naquele local é de 375 metros, porque 0,5 segundo é o tempo que leva o som a percorrer a distância entre o fundo do barco e o fundo do mar, reflectir-se e voltar.

Nesta actividade pode ainda ser referido que os morcegos recorrem ao eco para se deslocarem e caçarem outros animais no escuro. Os morcegos emitem sons (da gama dos ultrassons) pela boca, várias vezes por segundo. Quando estes sons encontram obstáculos, por exemplo insectos, ratos ou outros animais, reflectem-se e os morcegos, ouvindo os ecos produzidos, orientam-se na direcção dos animais que pretendem caçar. As baleias também emitem ultrassons para localizarem outras baleias ou para encontrarem o seu caminho.

Quando a velocidade das ondas varia, ocorre um fenómeno chamado refacção, que provoca uma alteração da direcção de propagação ou um “encurvamento” das ondas. A alteração de velocidade pode ocorrer abruptamente aquando da passagem da onda de um meio para outro (Figura 2.61), ou pode variar gradualmente no interior do próprio meio (Figura 2.62).

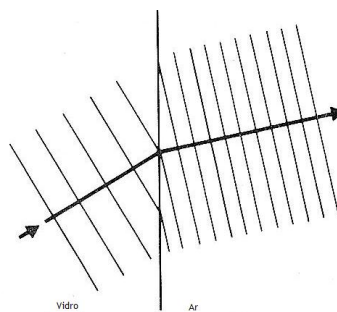


Figura 2.61 - Ondas sonoras que passam do vidro para o ar (adaptado de Rossing, 1989).

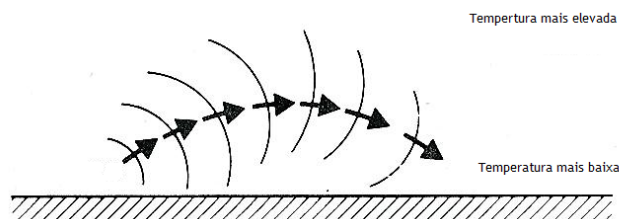


Figura 2.62 - Ondas sonoras na atmosfera quando a temperatura varia com a altura (adaptado de Rossing, 1989).

Na Figura 2.63 verifica-se uma alteração da direcção da propagação da onda quando passa do ar para o vidro. Essa alteração deve-se à alteração do comprimento de onda, uma vez que a frequência se mantém constante, havendo uma variação da velocidade de propagação. Neste caso, a velocidade do som diminui quando passa para o ar e o raio refractado aproxima-se da normal, conforme a figura 2.63.

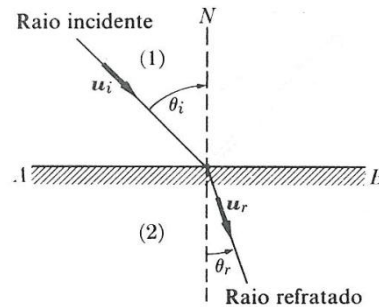


Figura 2.63 - Refracção de uma onda sonora.

Esta alteração da velocidade está de acordo com a lei da refração que pode ser traduzida pela equação:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r. \quad (2.36)$$

Assim, e uma vez que v_2 (velocidade do som no ar) é menor que v_1 (velocidade do som no vidro), conclui-se que $\sin \theta_i$ (θ_i é o ângulo de incidência) é maior que $\sin \theta_r$ (θ_r é o ângulo de refração), ou seja, θ_i é maior que θ_r .

A situação ilustrada na Figura 2.62 ocorre, por vezes, nas horas mais frescas ao entardecer e, desta forma, o som consegue ser ouvido a maiores distâncias. Uma vez que a velocidade do som no ar aumenta com a temperatura (secção 2.4), o som desloca-se mais depressa acima do solo onde a temperatura é mais elevada. Desta forma, o som encurva em direcção ao solo conforme representado. O som que normalmente seria perdido para as camadas mais elevadas é refractado para o solo.

Não é só a diferença de temperatura das camadas de ar que causa a refração do som. O vento pode provocar mudanças na direcção de propagação das ondas sonoras, originando zonas de “sombras sonoras”.

Embora a passagem do som de um meio para outro de densidade diferente possa mudar a sua direcção de propagação, quando isso sucede é reflectida uma quantidade considerável de som na fronteira dos dois meios. Assim, a intensidade do som refractado é reduzida e a refração é detectada com alguma dificuldade.

Actividade 2.26

Ainda que a refacção do som não seja fácil de detectar, pode ser verificada utilizando dois balões, um cheio de dióxido de carbono e o outro cheio de hélio. Na bancada é colocado um altifalante ligado a um gerador de sinais e um microfone ligado a uma calculadora gráfica a cerca de 20 cm um do outro e perfeitamente alinhados. No gerador de sinais é seleccionada uma onda com frequência compreendida entre 2000 Hz e 4000 Hz e o microfone detecta o som que é visualizado no ecrã da calculadora. Os balões são inseridos (um de cada vez) entre o altifalante e o microfone para que seja observável a evolução do sinal. Quando é colocado o balão cheio de dióxido de carbono observa-se um aumento da intensidade do sinal. Quando se coloca o balão cheio de hélio detecta-se uma diminuição da intensidade do sinal. Estas observações mostram que o som pode ser refractado. O balão cheio de dióxido de carbono possui um meio onde o som se propaga com menor velocidade em comparação ao ar, funciona como uma “lente convergente”. Uma vez que a velocidade do som no hélio é superior à velocidade do som no ar, o balão cheio de hélio actua como uma “lente divergente” e o sinal recebido na calculadora gráfica possui uma intensidade menor.



Figura 2.64 - Montagem para a verificação da refacção das ondas sonoras.

Actividade 2.27

Nesta actividade é proposto inicialmente um debate sobre radares e sonares e a identificação das semelhanças e diferenças entre eles. Deve-se, no final, realçar o facto de ambos emitirem ondas (o radar emite ondas electromagnéticas e o sonar ondas sonoras - ultrassons) que são reflectidas numa superfície e originam um eco e esse som reflectido é captado e depois analisado pelo aparelho. Referir que o termo sonar provém da expressão *sound navigation ranging* (regulação da navegação através do som). A utilização das ondas

sonoras na água, sendo um meio onde existem camadas a diferentes temperaturas, pode servir como exemplo para verificar o fenómeno da refacção.

No verão a temperatura da água (e a velocidade da onda sonora) diminui com a profundidade e, desta forma, a onda sonora refractada aproxima-se da normal das superfícies de separação das camadas e o alcance do sonar é menor, comparativamente ao inverno (Figuras 2.65 e 2.66). Isto acontece porque no inverno a temperatura da água aumenta com a profundidade e a onda sonora refractada afasta-se da normal, “encurvando-se” para cima.

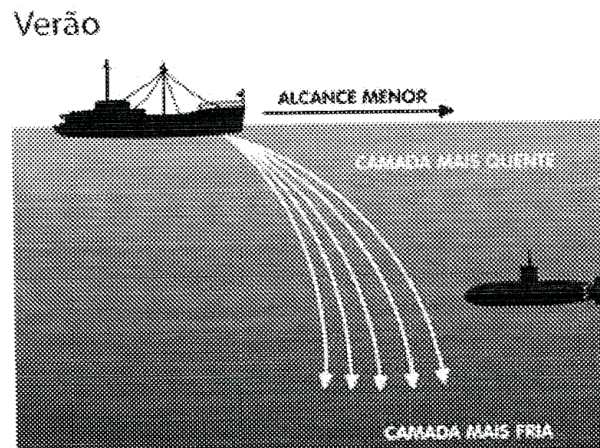


Figura 2.65 - Onda sonora refractada na água no verão.

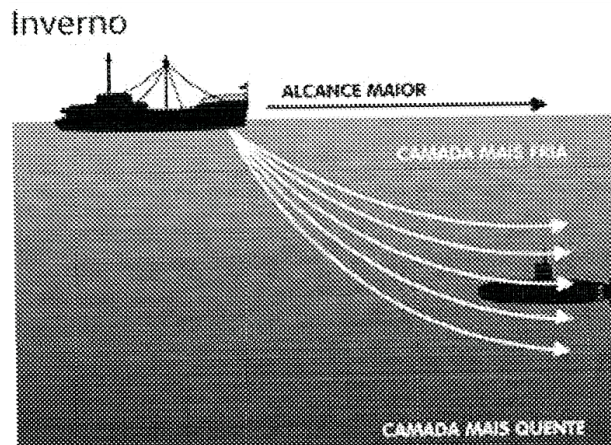


Figura 2.66 - Onda sonora refractada na água no inverno.

Além de se reflectirem e refractarem, as ondas sonoras também podem contornar obstáculos. Uma onda sonora pode atingir zonas por detrás de um obstáculo que esteja no seu caminho desde que o comprimento de onda seja comparável às dimensões do obstáculo (Figura 2.67). A difracção também pode ocorrer quando a onda incide sobre um orifício com o tamanho da ordem de grandeza do seu comprimento de onda. Do outro lado da barreira surgem ondas, mas esféricas em vez de planas (Figura 2.68).

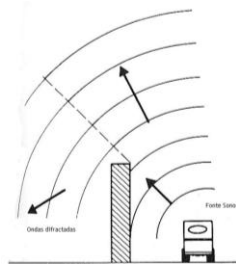


Figura 2.67 - Onda sonora difractada por um obstáculo (adaptado de Rossing, 1989).

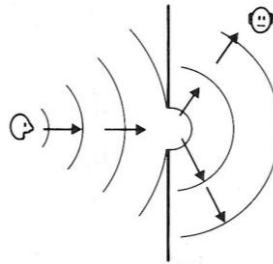


Figura 2.68 - Onda sonora difractada através de uma abertura (por exemplo uma porta).

As ondas sonoras audíveis têm comprimentos de onda de 1,7 centímetros (frequência de 20 000 Hz) a 17 metros (frequência de 20 Hz). Por isso difractam-se facilmente, contornando esquinas, obstáculos e muros, porque possuem comprimentos de onda da ordem de grandeza desses objectos.

Actividade 2.28

A difracção das ondas sonoras pode ser observada se ouvirmos o vídeo <http://www.youtube.com/watch?v=iQsvMf8X0FY> em diferentes condições. Se o ouvirmos na porta da entrada da sala de aula ouviremos os diferentes instrumentos da forma normal. No entanto, se nos colocarmos ao lado da porta na parte de fora, ou atrás de uma esquina, ouviremos melhor os instrumentos que emitem sons mais graves (neste caso o contrabaixo), comparativamente aos instrumentos mais agudos (neste caso o saxofone soprano). Isto acontece porque os sons mais graves possuem uma frequência mais baixa e consequentemente um maior comprimento de onda. Estes comprimentos de onda estão mais perto da ordem de grandeza da abertura da porta quando comparados com os comprimentos de onda dos sons mais agudos. Assim, os sons com maiores comprimentos de onda difractam-se mais, e podem ser ouvidos mesmo da parte de fora da porta.

2.7 Espectro Sonoro

O ouvido humano (Figura 2.69) pode dividir-se em três partes: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno. O ouvido externo capta o som e encaminha-o para o tímpano através do canal auditivo. As vibrações do tímpano são comunicadas a um sistema de amplificação constituído por três ossos interligados: o martelo, a bigorna e o estribo. Estas vibrações são depois transmitidas ao ouvido interno onde são convertidas em impulsos nervosos que são transmitidos ao cérebro pelo nervo auditivo.

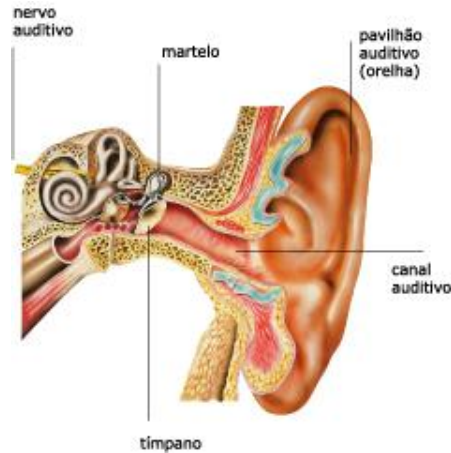


Figura 2.69 - Ouvido humano.

No entanto, o ouvido humano só é sensível a ondas sonoras com certas características de intensidade e altura (Figura 2.70). No que respeita à intensidade, verificamos que sons de menor frequência só são detectados para valores elevados de nível sonoro. Em contrapartida, sons de frequências mais elevadas são detectados pelo ouvido a partir de pequenos valores de nível sonoro.

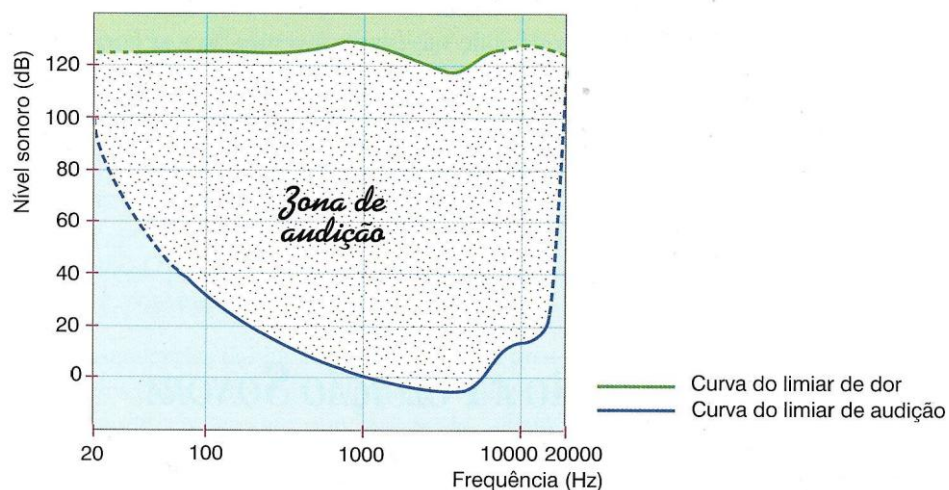


Figura 2.70 - Gráfico relativo à sensibilidade do ouvido humano (adaptado de Pereira, 1996).

Quanto à frequência, o ouvido humano só percepção ondas sonoras com frequências compreendidas entre os 20 Hz e os 20 000 Hz. Os sons neste intervalo de frequências dizem-se audíveis. Se a frequência for inferior a 20 Hz os sons são denominados infra-sons. Os ultra-sons são aqueles que têm frequência superior a 20 000 Hz (Figura 2.71).

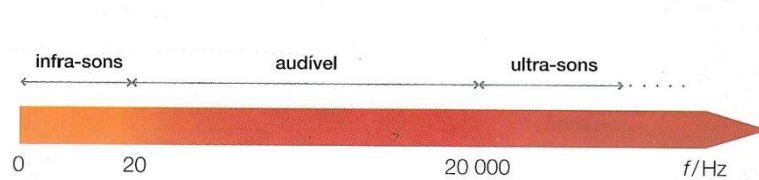


Figura 2.71 - Espectro Sonoro (adaptado de Ventura, 2008).

De uma forma geral, a capacidade de ouvir os sons pelo ser humano depende da idade e dos níveis sonoros a que o ouvido foi sujeito. Se uma pessoa ouve mal, para que consiga ouvir o som ele tem que ter um nível sonoro mais elevado. Com a idade, os limiares de audibilidade vão aumentando e as frequências mais elevadas, mesmo que intensas, deixam de ser ouvidas.

Actividade 2.29

Nesta actividade liga-se um altifalante ao computador com o programa Test Tone Generator instalado (o computador funciona como um gerador de sinais) e escolhe-se uma frequência de 1000 Hz. De seguida, regula-se a intensidade de modo que o som seja ouvido em toda a sala. Sem alterar esta intensidade, seleccionam-se várias frequências, primeiro cada vez menores e, depois, partindo ainda de 1000 Hz, cada vez maiores. Determina-se a partir de que frequências, alta e baixa, alguém deixa de ouvir o som.



Figura 2.72 - Grupo de alunos que detectam sons com diferentes frequências.

Os infra-sons e ultra-sons, embora inaudíveis para os seres humanos, são ouvidos por alguns animais: por exemplo, os elefantes emitem infra-sons e as aranhas conseguem detectá-los; os golfinhos e os morcegos comunicam e orientam-se por emissão e recepção de ultra-sons.

Os infra-sons têm pouca utilização e podem ser provocados pelas vibrações de certas máquinas e actuam directamente nos órgãos internos do corpo, provocando irritação nos terminais dos nervos. A exposição aos infra-sons durante períodos longos é extremamente perigosa para a saúde, uma vez que ao não serem audíveis descuramos a prevenção.

Os ultra-sons têm aplicação na detecção submarina, determinação da profundidade do mar e localização de cardumes de peixes. Esta aplicação reside no facto dos ultra-sons se propagarem num cone muito estreito, sendo por isso altamente direccionais e alcançando grandes distâncias. Para além disso, os feixes de ultra-sons quando encontram a superfície de separação de dois meios sofrem preferencialmente reflexão. Os ultra-sons são ainda utilizados na medicina como meio de diagnóstico e para tratamento de várias patologias, incluindo o reumatismo, ciática e tumores ósseos.

3. Actividades elementares sobre luz

3.1 Propagação rectilínea da luz

O comprimento de onda da luz é muito pequeno quando comparado com a maioria dos obstáculos e aberturas vulgares. Assim, a difracção - a curvatura das ondas em torno de cantos ou arestas - é, muitas vezes, desprezável e a aproximação rectilínea, que considera propagarem-se as ondas segundo linhas rectas, é válida nestas circunstâncias. Esta propagação rectilínea requer ainda que o meio seja transparente e homogéneo.

Actividade 3.1

O facto da luz também se propagar em linha recta pode ser verificado recortando três cartões quadrados com cerca de 20 cm e fazendo um furo no centro de dois desses cartões. Os cartões são colocados sobre uma superfície horizontal e fixados, em posição vertical, com auxílio de plasticina, de modo a que o cartão não perfurado não fique no meio, uma vez que vai servir como alvo. Dirigindo o feixe luminoso de uma lanterna de modo a iluminar os dois orifícios, que foram anteriormente alinhados utilizando uma agulha de tricotar, verifica-se que o feixe atinge o alvo. Se o cartão do meio for deslocado, desfazendo o alinhamento dos orifícios, o feixe luminoso já não atinge o cartão que serve como alvo.



Figura 3.1 - Verificação da propagação rectilínea da luz.

Actividade 3.2

A formação das sombras é também uma consequência da propagação rectilínea da luz. Nesta actividade coloca-se uma placa opaca com um pequeno orifício diante de um projector, obtendo-se assim uma fonte de luz pontual. Escurece-se a sala e interpõe-se um objecto opaco entre essa fonte pontual e um ecrã. Verifica-se que uma parte do objecto não fica iluminada, dando origem a uma zona chamada sombra própria. Uma parte do ecrã fica

igualmente obscurecido, zona designada por sombra projectada, e é possível ainda verificar que existe uma porção do espaço entre o objecto e o ecrã privada de luz, zona designada de cone de sombra.



Figura 3.2 - Formação de sombras utilizando uma fonte de luz pontual.

Se utilizarmos uma fonte de luz não pontual (por exemplo um candeeiro) passa a ser identificável uma região de penumbra, isto é, uma zona onde chega apenas luz proveniente de uma parte da fonte luminosa.

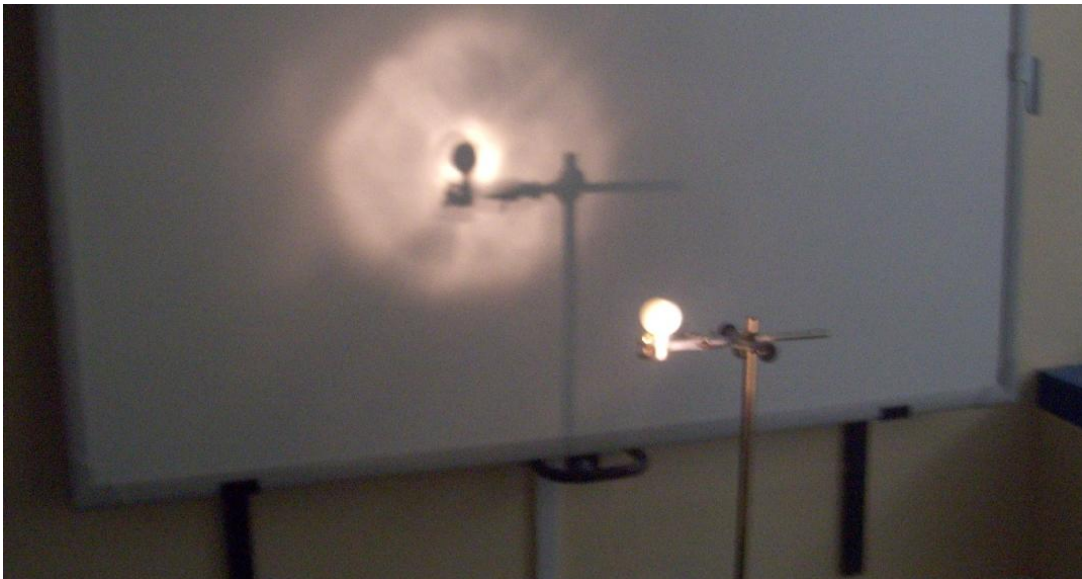


Figura 3.3 - Formação de sombras utilizando uma fonte de luz não pontual.

Actividade 3.3

A propagação da luz num meio óptico heterogéneo pode ser estudada colocando açúcar no fundo de uma tina. Verte-se depois água, muito lentamente para se obter uma mistura de água e açúcar com massas volúmicas diferentes que variem com a altura. Neste caso a massa volúmica aumenta gradualmente da superfície até ao fundo. Ao fazer incidir um feixe luminoso ao longo da tina verifica-se que os raios luminosos não possuem uma trajectória rectilínea.

Actividade 3.4

A formação da imagem invertida de uma vela numa câmara escura é um exemplo comprovativo da propagação rectilínea da luz. A câmara pode ser construída utilizando uma caixa, onde uma das faces é substituída por uma folha de papel vegetal e na face oposta é feito um pequeno orifício. A obtenção da imagem é conseguida efectuando a montagem da Figura 3.4.



Figura 3.4 - Esquema da montagem para a verificação da imagem invertida de uma vela numa câmara escura.



Figura 3.5 - Imagem invertida de uma vela na câmara escura.

3.2 Reflexão da luz e espelhos

Quando as dimensões e as distâncias envolvidas nos cálculos ou nas experiências são muito maiores que o comprimento de onda (o que acontece quase sempre em óptica), os fenómenos da reflexão, da refacção e da dispersão podem ser compreendidos, adequadamente, utilizando raios de luz para descrever a propagação rectilínea da luz e desprezando os efeitos da interferência e da difracção.

Quando a luz encontra uma superfície, muda de direcção de propagação tal como acontece com o som. Esse fenómeno se ocorrer no mesmo meio chama-se reflexão e consiste na mudança de direcção, ou pelo menos de sentido, que os raios luminosos sofrem quando incidem na superfície de separação de dois meios. O raio luminoso facilita a visualização da propagação da luz e é uma linha desenhada no espaço que representa a direcção do fluxo de energia radiante. Num meio homogéneo os raios luminosos são rectilíneos e se for isotrópico (se tiver as mesmas propriedades em todas as direcções) os raios luminosos são perpendiculares às frentes de onda. Esta mudança de direcção obedece às leis da reflexão (Figura 3.6): (a) o raio incidente, a normal à superfície no ponto de incidência e o correspondente raio reflectido estão no mesmo plano; (b) o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

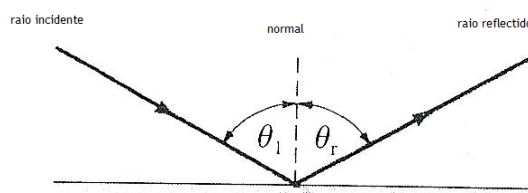


Figura 3.6 - O ângulo de incidência, θ_i , é igual ao ângulo de reflexão, θ_r .

Actividade 3.5

Nesta actividade pretende-se comprovar as leis da reflexão da luz efectuando a montagem da Figura 3.7, onde se coloca uma folha de papel branco sobre uma placa de corticite e utiliza-se um vidro. Representa-se um segmento que represente o raio incidente. Marca-se na folha, a normal ao vidro no ponto de incidência. Coloca-se o vidro na posição indicada, e espetam-se dois alfinetes sobre o segmento que representa o raio incidente.

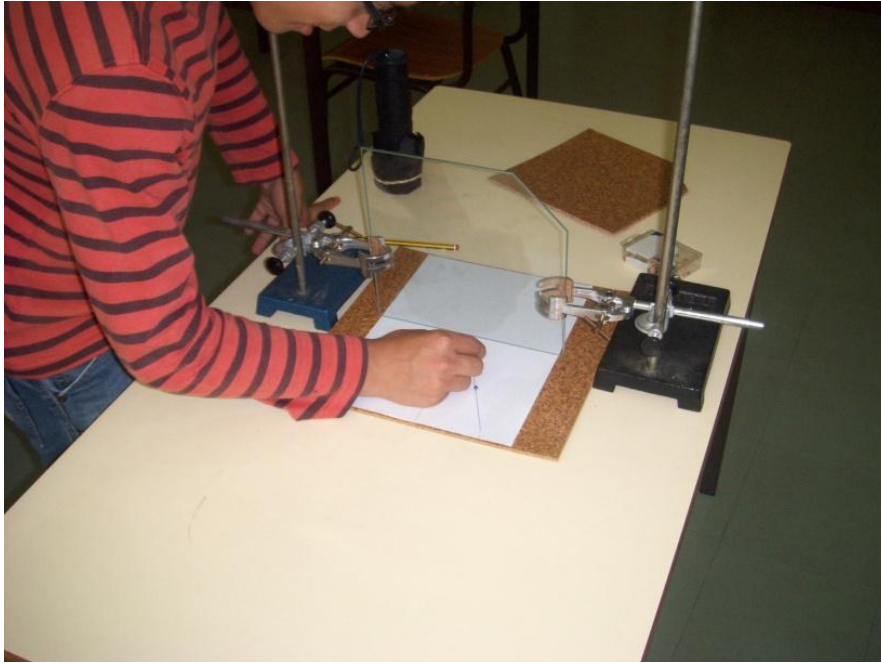


Figura 3.7 - Aluno que espeta dois alfinetes no segmento de recta que representa o raio incidente.

Ao olhar pelo canto da placa de corticite procura-se espetar dois alfinetes de modo a ficarem coincidentes com as imagens dos dois primeiros (Figura 3.8).

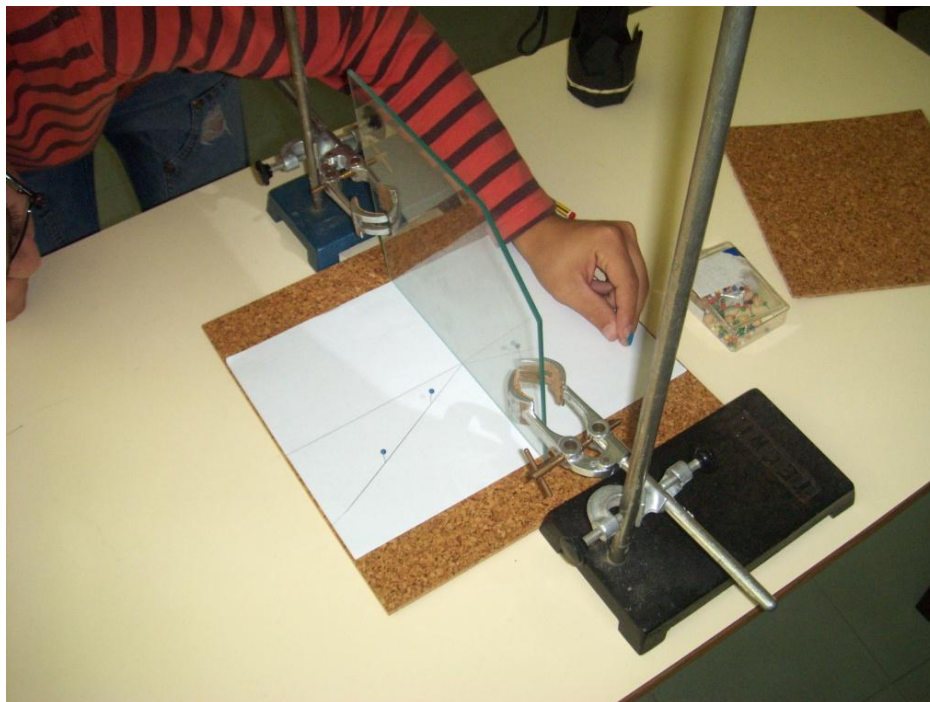


Figura 3.8 - Aluno que coloca dois alfinetes coincidentes com a imagem dos dois que se encontram à frente do vidro.

De seguida, retira-se o vidro e traça-se o segmento de recta que passa pelos pontos onde se espetaram os dois últimos alfinetes, e representa-se o trajecto da luz quando, ao

incidir no vidro, mudou de direcção e voltou a propagar-se no mesmo meio. Trata-se do raio reflectido (Figura 3.9). Com o auxílio de um transferidor mede-se o ângulo de incidência e o de reflexão e confirma-se a igualdade no valor destes ângulos.

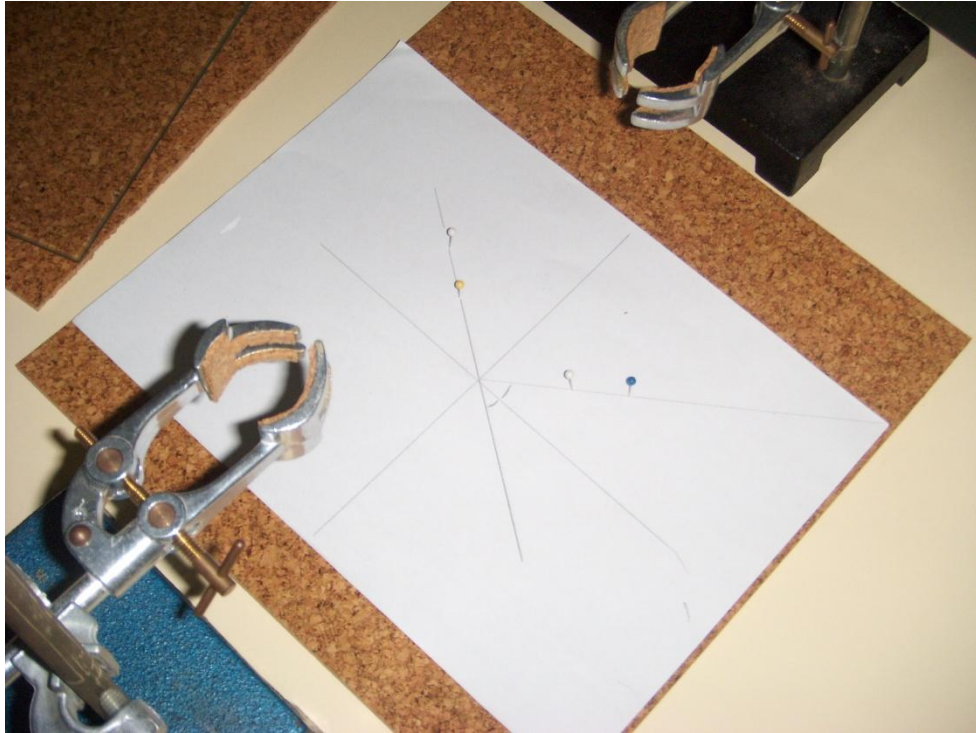


Figura 3.9 - Verificação da igualdade do ângulo de incidência e de reflexão.

Actividade 3.6

A verificação das leis da reflexão pode também ser feita utilizando uma lanterna, um espelho plano e uma folha dispostos conforme a Figura 3.10.

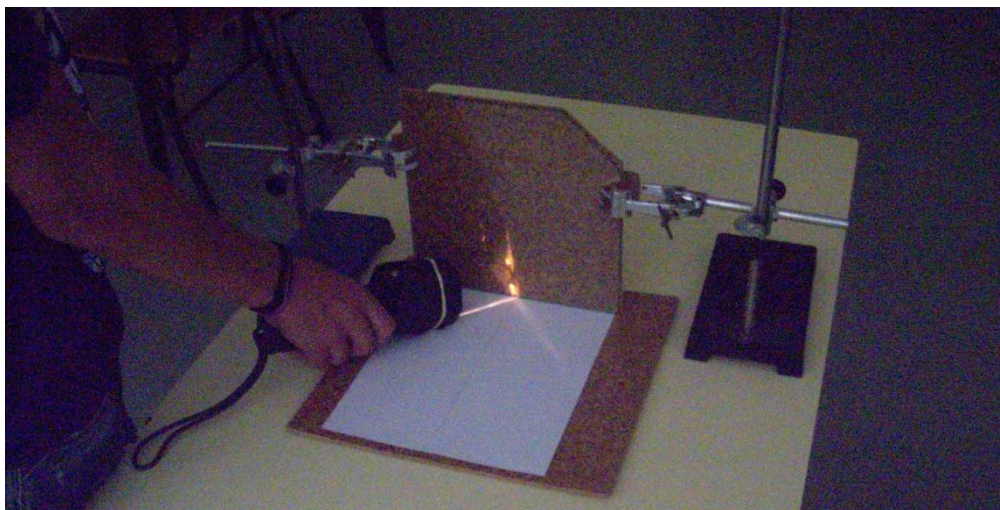


Figura 3.10 - Verificação experimental da lei da reflexão.

Liga-se a lanterna e ilumina-se o espelho segundo diferentes inclinações, ou seja, diferentes ângulos de incidência. Verifica-se que o raio incidente, o raio reflectido e a normal (traçada a lápis na folha branca) se encontram no mesmo plano e localiza-se o raio reflectido

na folha medindo o ângulo que esse raio faz com a normal (ângulo de reflexão). Confirma-se a igualdade no valor destes ângulos.

Nos espelhos planos utilizados nas actividades anteriores são formadas imagens cujas características podem ser determinadas utilizando as leis da reflexão e os raios luminosos. Se considerarmos a Figura 3.11, demonstra-se que $\overline{OS} = \overline{OP}$, ou seja, a imagem P e o objecto S encontram-se à mesma distância da superfície.

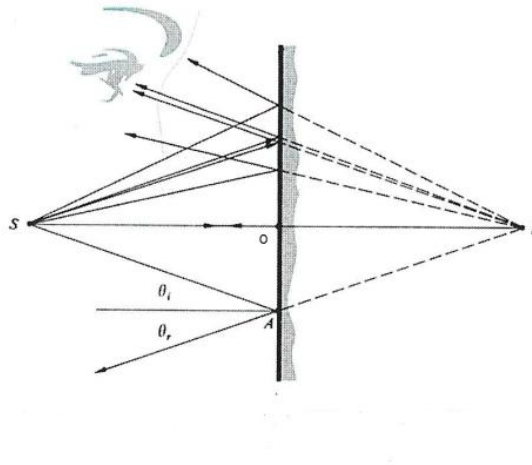


Figura 3.11 - Espelho plano e a reflexão de raios luminosos (adaptado de Hecht, 2002).

Considerando a lei da reflexão pode-se afirmar que $\theta_i = \theta_r$, por outro lado $\theta_i + \theta_r$ é o ângulo externo do triângulo SPA e é, assim, igual à soma dos ângulos internos não adjacentes, ângulo OSA + ângulo OPA; mas ângulo OSA = θ_i , logo ângulo OSA = ângulo OPA. Os triângulos OAS e OPA são, desta forma, iguais e $\overline{OS} = \overline{OP}$. A imagem de P é virtual (a luz não emana dessa imagem) e a imagem não se forma sobre qualquer alvo. A imagem tem o mesmo tamanho que o objecto e tem a mesma orientação. No entanto, a imagem de uma mão direita num espelho plano é uma mão esquerda. Esta inversão de direita para a esquerda é consequência de uma inversão de profundidade, isto é, a mão direita transforma-se em esquerda porque a frente e as costas da mão são invertidas pelo espelho.

Actividade 3.7

As características da imagem formada num espelho plano podem ser confirmadas colocando uma vela acesa em frente de um vidro plano, sem revestimento, e uma segunda vela de configuração idêntica à primeira, mas apagada e colocada atrás do vidro (Figura 3.12).



Figura 3.12 - Montagem utilizando duas velas e um vidro para verificar as características das imagens formadas num espelho plano.

Olhando através do vidro tenta-se sobrepor a vela apagada e a imagem da vela acesa (Figura 3.13). Quando essa sobreposição ocorre a vela parece acender-se e constata-se que a imagem da vela é simétrica da vela acesa em relação ao espelho. Conclui-se assim que num espelho plano a imagem formada é virtual, direita e forma-se à mesma distância do espelho que o objecto.



Figura 3.13 - Verificação das características da imagem formada num espelho plano.

Actividade 3.8

Nesta actividade identificam-se as características de uma imagem formada num espelho plano, utilizando material simples, nomeadamente: um vidro, uma placa de corticite, um lápis e um alfinete.

Em primeiro lugar, coloca-se um vidro no meio de uma folha de papel e esta em cima de uma placa de corticite e com um lápis desenha-se uma linha ao longo do vidro (Figura 3.14). Coloca-se depois um alfinete em frente do vidro e marca-se a sua posição.



Figura 3.14 - Grupo de alunos que coloca um alfinete em frente do vidro e tenta sobrepor outro com a imagem formada atrás do vidro.

Com uma régua inclinada em relação ao vidro traçam-se várias linhas ao longo da régua. Um dos traços deverá ser perpendicular ao vidro, entre o alfinete e o vidro (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Aluno que traça várias linhas ao longo da régua.

Alinha-se a régua com os raios traçados e desenham-se na folha de papel. Depois retira-se o vidro e prolongam-se a tracejado os raios reflectidos pelo vidro até que se encontrem num ponto (Figura 3.16). Confirma-se que a distância do objecto e da imagem ao vidro é igual e que a imagem do alfinete é direita.

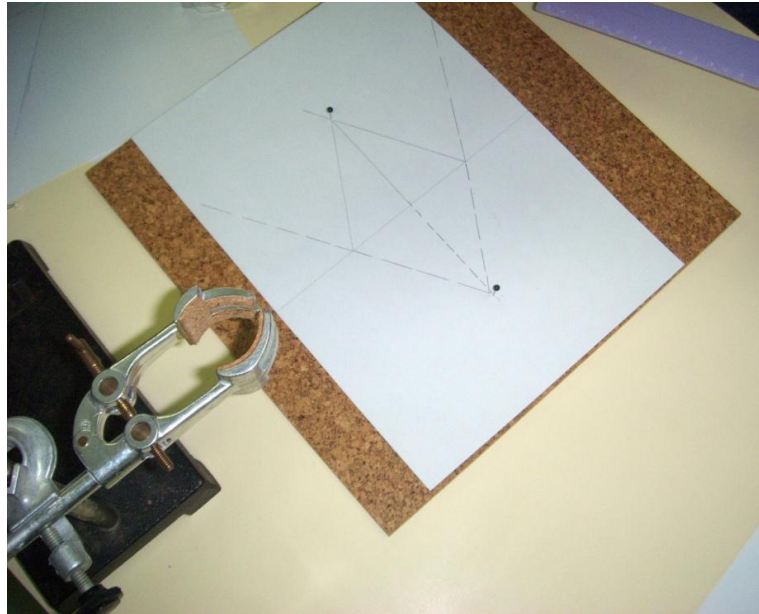


Figura 3.16 - Verificação da igualdade da distância do objecto e da imagem ao vidro.

Na Figura 3.17 está representado um feixe de raios que têm origem numa fonte luminosa P , e se reflectem num espelho côncavo (espelho esférico cuja superfície interior da calote é polida) convergindo para um ponto P' . Os raios a partir deste ponto divergem como se aí existisse um objecto. Esta imagem é uma imagem real, pois a luz emana desse ponto e pode ser observada num alvo. Uma imagem virtual, como a formada por um espelho plano, não pode ser observada atrás do espelho, pois a luz não atravessa o espelho. No entanto, apesar desta diferença, os raios de luz que divergem de uma imagem real e os que parecem divergir de uma imagem virtual são idênticos e o olho não faz qualquer distinção entre as duas imagens.

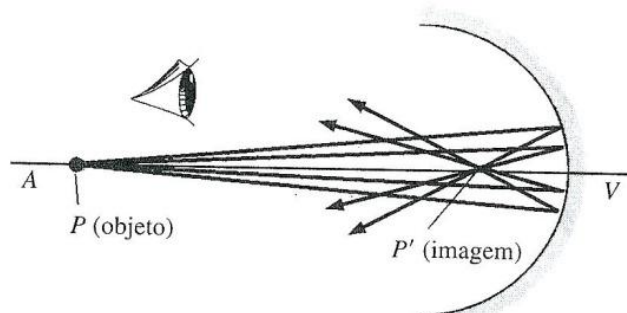


Figura 3.17 - Reflexão de raios luminosos num espelho côncavo (adaptado de Tipler, 1995).

Na Figura 3.18 pode-se observar que só os raios que atingem o espelho esférico nos pontos próximos ao eixo AV são reflectidos para o ponto-imagem, são denominados de raios paraxiais. Os raios que atingem o espelho em pontos afastados do eixo, raios abaxiais, convergem para diferentes pontos nas vizinhanças do ponto imagem e fazem com que a imagem apareça pouco nítida, fenómeno designado como aberração esférica.

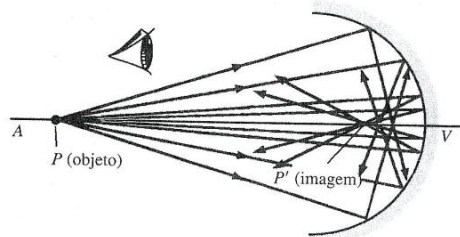


Figura 3.18 - Aberração esférica (adaptado de Tipler, 1995).

A imagem entre o vértice do espelho V (ponto de intersecção do eixo principal com o espelho) e o ponto P' está relacionada com a distância entre o vértice V e o ponto-objecto P e o raio da curvatura do espelho (raio da calote a que o espelho pertence). Na Figura 3.19 está representado um raio que sai de um ponto-objecto P, se reflecte no espelho e passa pelo ponto-imagem P'. O ponto C é o centro de curvatura do espelho (centro da calote a que o espelho pertence).

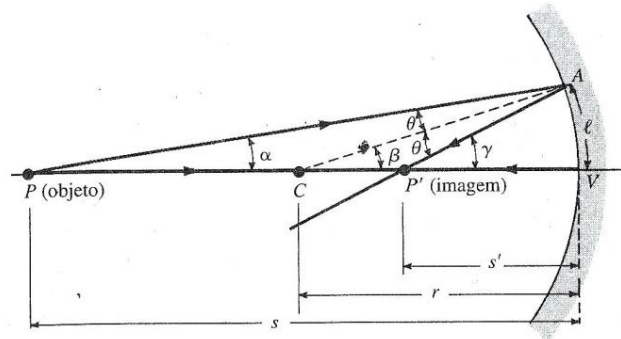


Figura 3.19 - Geometria para o cálculo da distância da imagem (adaptado de Tipler, 1995).

O raio incidente e reflectido no espelho fazem ângulos iguais (lei da reflexão) com a normal ao espelho CA no ponto de incidência do raio. Considere-se s a distância do objecto ao espelho, s' a distância da imagem ao espelho e r o raio da curvatura do espelho. O ângulo B é um ângulo externo do triângulo PAC e, desta forma, é igual à soma dos ângulos internos não adjacentes, ou seja, $\alpha + \theta$:

$$B = \alpha + \theta. \quad (3.1)$$

De igual modo, no triângulo PAP',

$$y = a + 2\theta \quad (3.2)$$

eliminando θ , obtém-se:

$$2B = a + y \quad (3.3)$$

Considerando que os ângulos do raio incidente e reflectido com o eixo do espelho são pequenos (todos os raios são paraxiais), podemos fazer a aproximação dos pequenos ângulos e $\alpha \approx l/s$, $B \approx l/r$ e $\gamma \approx l/s'$, assim obtemos a equação:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r} \quad (3.4)$$

Quando a distância do objecto ao espelho é muito maior que o raio da curvatura do espelho o termo $\frac{1}{s}$ é muito menor que $\frac{2}{r}$ e pode assim ser desprezado e obtemos $s' = \frac{1}{2}r$. Esta distância é designada por distância focal, f , e a equação (3.4) - equação do espelho - pode apresentar a forma:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

A localização das imagens nos espelhos pode ser feita utilizando uma construção geométrica denominada diagrama de raios. Na Figura 3.20 está uma ilustração do diagrama, onde o objecto é uma figura humana perpendicular ao eixo de um espelho e à distância s do vértice desse espelho. Nesta figura está traçado um raio paralelamente ao eixo e que se reflecte passando pelo foco do espelho (raio paralelo), um raio que passa no foco e é reflectido paralelamente ao eixo (raio focal) e um raio que passa no centro da curvatura que atinge perpendicularmente a superfície do espelho e reflecte-se na direcção da incidência (raio radial). A intersecção de quaisquer dois raios localiza o ponto-imagem da cabeça da figura objecto.

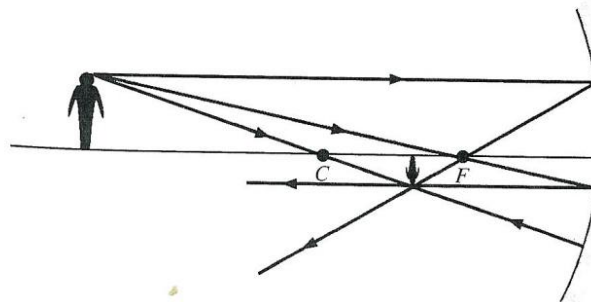


Figura 3.20 - Diagrama de raios para a localização da imagem mediante construção geométrica (adaptado de Tipler, 1995).

Pode-se verificar na figura que a imagem está invertida e não tem o mesmo tamanho do objecto. A razão entre o tamanho da imagem e o tamanho do objecto é a ampliação transversa.

Na Figura 3.21 está traçado um raio que incide no vértice do espelho e é reflectido fazendo com o eixo do espelho um ângulo igual ao de incidência (raio central). Podemos ainda, verificar que a ampliação transversa y' / y é igual à razão s' / s .

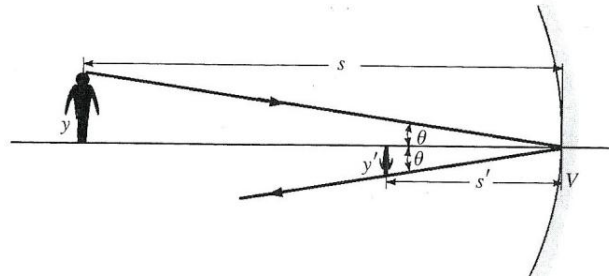


Figura 3.21- Geometria para calcular a ampliação num espelho esférico (adaptado de Tipler, 1995).

Para identificar as características das imagens formadas por qualquer tipo de espelho pode-se utilizar a seguinte convenção de sinais (Tipler, 1995):

Tabela 3.1 - Convenção de sinais na reflexão para espelhos

Grandeza	Sinal	
	+	-
s	se o objecto estiver na frente do espelho (objecto real)	se o objecto estiver atrás do espelho (objecto virtual)
s'	se a imagem estiver na frente do espelho (imagem real)	se a imagem estiver atrás do espelho (imagem virtual)
r, f	se o centro de curvatura estiver em frente do espelho (espelho côncavo)	se o centro de curvatura estiver atrás do espelho (espelho convexo)

Com esta convenção de sinais a equação (3.5) pode ser utilizada com qualquer tipo de espelhos. A ampliação transversa pode ser dada por:

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \quad (3.6)$$

Nos espelhos planos o raio da curvatura é infinito e a distância focal também é infinita. Utilizando a equação (3.5) obtém-se $s = -s'$, ou seja, a distância da imagem atrás do espelho é igual à distância do objecto na frente do espelho. A ampliação que pode ser calculada pela expressão (3.6) é igual a + 1, o que mostra que a imagem é direita e tem o mesmo tamanho do objecto.

Nos espelhos convexos, e conforme mostra a Figura 3.22 utilizando um diagrama de raios, podemos verificar que a imagem se forma atrás do espelho (virtual) é direita e menor que o objecto ($s' < s$), independentemente da distância a que o objecto se encontra do espelho.

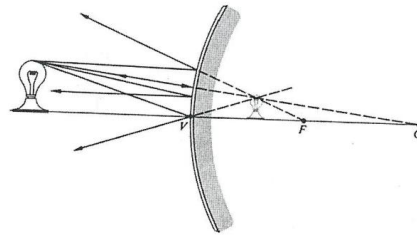


Figura 3.22 - Imagem de objecto extenso por espelho convexo (adaptado de Hecht, 2002).

Nos espelhos côncavos as propriedades das imagens formadas dependem da distância do objecto em relação ao espelho. Essas propriedades estão resumidas na tabela 3.2 e estão representadas graficamente na Figura 3.23.

Tabela 3.2 - Imagens de objectos reais formadas por espelhos côncavos

OBJECTO	IMAGEM		
	Localização	Tipo	Orientação
$\infty > s > 2f$	Real	Invertida	Reduzida
$s = 2f$	Real	Invertida	Igual
$f < s < 2f$	Real	Invertida	Ampliada
$s = f$	$\pm \infty$		
$s < f$	Virtual	Direita	Ampliada

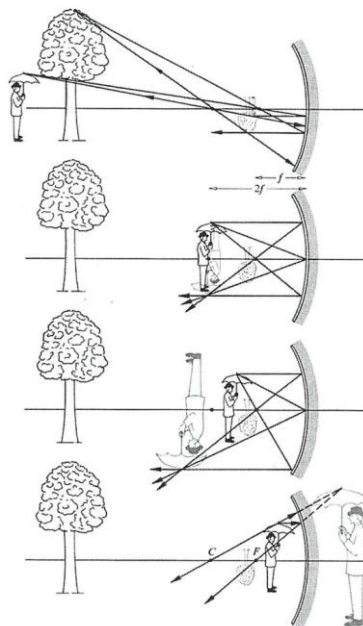


Figura 3.23 - Formação de imagem por um espelho esférico côncavo (adaptado de Hecht, 2002).

Actividade 3.9

Uma colher bem polida pode ser utilizada como um espelho convexo se utilizarmos a parte exterior, ou côncavo se utilizarmos a parte interior.

Ao observar a imagem formada pela parte exterior da colher, constata-se que esta imagem é menor do que o objecto e direita, não tendo qualquer influência a distância a que o objecto se encontra do espelho.

Quando se utiliza a parte interior da colher, podemos colocar inicialmente um pequeno objecto a uma distância superior a $2f$ (como a colher tem um valor de f reduzido a distância não necessita de ser muito grande) e verificar que a imagem obtida é invertida e menor que o objecto. Aproxima-se depois o objecto da colher e verifica-se que a imagem aumenta, até que, quando a distância iguala $2f$, a imagem aparece invertida e do mesmo tamanho do objecto. Aproximando ainda mais o objecto, a imagem continua a aumentar até preencher completamente o espelho, praticamente sem perda de nitidez. À medida que a distância diminui ainda mais, a imagem (direita e ampliada) vai diminuindo até que o objecto entre em contacto com o espelho e a imagem toma de novo o tamanho natural.



Figura 3.24 - Imagem formada pela parte exterior de uma colher.



Figura 3.25 - Imagem formada pela parte interior de uma colher com o objecto colocado a uma distância superior a $2f$.

Actividade 3.10

As características das imagens de um objecto, situado em frente a um espelho, podem ser observadas utilizando um espelho côncavo e outro convexo, uma vela acesa e um alvo (pode ser a parede ou uma folha branca de papel). A vela acesa deve ser colocada entre o espelho e o alvo, primeiro próximo deste, e depois, lentamente, deve ser aproximada do espelho. Verificar-se-á que as imagens se modificam à medida que a vela se aproxima. A tabela 3.2 poderá ser um resumo das características das imagens obtidas com os espelhos.



Figura 3.26 - Imagem formada por um espelho côncavo com o objecto colocado a uma distância superior a $2f$.

Nalgumas situações em que a luz incide numa superfície não ocorre uma reflexão especular, como as que foram analisadas anteriormente, mas ocorre reflexão difusa. Este fenómeno ocorre quando a rugosidade da superfície é significativa (quando consideramos distâncias da ordem de λ) e apesar de os ângulos de incidência e de reflexão serem iguais para cada raio, o conjunto de raios reflectidos dá origem a um feixe que não se propaga ao longo de uma direcção bem definida.

3.3 Refracção da luz e lentes

Quando um raio luminoso atinge uma superfície que separa dois meios ópticos diferentes, uma superfície ar-vidro, por exemplo, parte da energia luminosa é reflectida e uma outra parte penetra no segundo meio. A refração consiste na transmissão da luz de um meio óptico para outro e normalmente está associada à mudança de direcção do raio óptico.

Considere-se um raio luminoso SO que incide na superfície de separação de dois meios 1 e 2, e OP o respectivo raio refractado (Figura 3.27). Estes raios encontram-se no mesmo plano que a normal à superfície que passa em O.

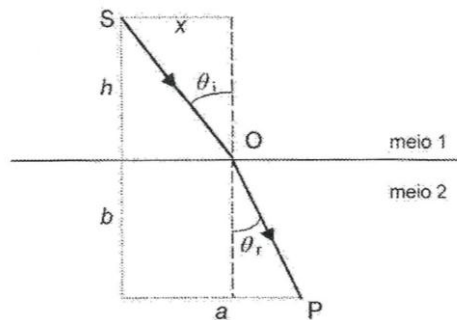


Figura 3.27 - Princípio de Fermat aplicado à refração (adaptado de Hecht, 2002).

A dedução da lei de Snell pode ser feita através da aplicação do princípio de Fermat : *a trajetória seguida por um raio luminoso entre dois pontos é aquela que é percorrida no menor intervalo de tempo possível.*

O tempo t que a luz demora a percorrer a distância entre S e P pode ser determinado pela expressão:

$$t = \frac{\overline{SO}}{v_1} + \frac{\overline{OP}}{v_2} \quad (3.6)$$

onde v_1 e v_2 são as velocidades de propagação da luz no meio 1 e no meio 2.

Substituindo, obtém-se

$$t = \frac{\sqrt{h^2+x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2+(a-x)^2}}{v_2} \quad (3.7)$$

O tempo será minimizado (relativamente a variações de x) quando $\frac{dt}{dx} = 0$, isto é,

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_1\sqrt{h^2+x^2}} + \frac{-(a-x)}{v_2\sqrt{b^2+(a-x)^2}} = 0 \quad (3.8)$$

utilizando a definição de seno de um ângulo e com base na Figura 3.27, a equação pode assumir a forma

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \quad (3.9)$$

que é a expressão algébrica da lei de Snell.

Se atendermos à definição de índice de refração (absoluto) n_i :

$$n_i = \frac{c}{v_i} \quad (3.10)$$

Quando a luz se propaga de um meio óptico para outro, a sua frequência não varia, se isso acontecesse, teríamos ou um “empilhamento” de frentes de onda na fronteira, ou uma situação de criação ou destruição de frentes de onda. Considerando que em qualquer meio óptico homogéneo e isotrópico é sempre válida a relação:

$$v = \lambda f \quad (3.11)$$

concluimos que quando a velocidade diminui (ou aumenta), o comprimento de onda também diminui (ou aumenta).

Actividade 3.11

Colocar uma moeda (por exemplo 1€) num recipiente opaco. O observador escolhe uma posição em que não veja a moeda, mas de modo que com um pequeno deslocamento possa vê-la. Mantendo-se o observador imóvel, deita-se água no recipiente e a moeda passa a ser visível.

Quando os raios luminosos atingem a superfície de separação entre a água e o ar estes raios sofrem uma mudança brusca de direcção: a luz é refractada. Todos os pontos-objeto da moeda emitem raios luminosos em todas as direcções. Quando não há água no recipiente, o raio luminoso 1 não atinge o olho do observador e assim este não vê a moeda. Quando há água no recipiente, o raio luminoso 2 atinge o olho do observador e a moeda passa a ser visível. Existem ainda outros raios que têm origem na moeda e que atingem o olho do observador (Figura 3.28).

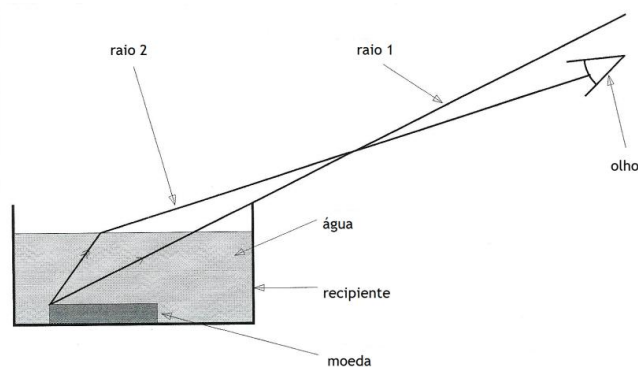


Figura 3.28 - Refracção da luz quando passa da água para o ar.

A refração da luz pode, ainda, ser observada colocando um prego inclinado e parcialmente imerso num copo com uma mistura de água e óleo vegetal. O prego parece que fica partido duas vezes (Figura 3.29). Isto acontece porque a luz propaga-se com velocidades diferentes nos três meios: ar, água e óleo. Propaga-se com maior velocidade no ar (índice de refração ≈ 1), a seguir na água (índice de refração = 1,33) e, mais lentamente, no óleo (índice de refração = 1,5). Para além disso, a mistura de água e óleo é heterogénea, porque os líquidos são não miscíveis, e o óleo, por ter uma densidade inferior à água, fica na parte superior da mistura. Neste caso, a luz sofre duas refrações, uma quando passa da água para o óleo e outra quando passa do óleo para o ar.



Figura 3.29 - Verificação da refração da luz numa mistura de óleo e água.

Considerando a equação 3.9, podemos concluir que quando ocorre uma passagem da luz de um meio para outro onde se desloca com maior velocidade (óleo para a água), o raio luminoso refractado afasta-se da normal e quando a luz passa de um meio para outro, onde se desloca com menor velocidade (ar para o óleo), o raio refractado aproxima-se da normal. Neste caso, utilizando o conceito de raio luminoso, obtemos o esquema representado na Figura 3.30.

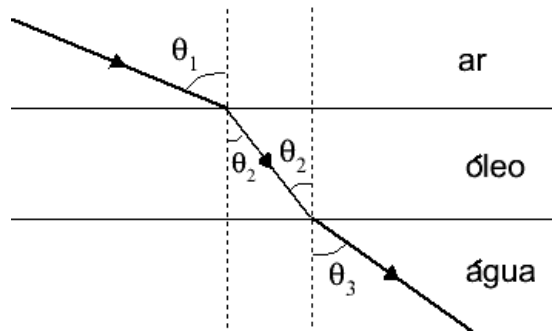


Figura 3.30 - Refracção da luz na mistura utilizada na actividade 3.11.

A refração pode ainda ser observada utilizando a montagem ilustrada na Figura 3.31, onde se utiliza uma caixa de sapatos com duas fendas estreitas separadas de 2 cm na face mais pequena, uma folha de papel branco no fundo da caixa e um copo de água colocado no meio da caixa e alinhado com as fendas. Numa sala obscurecida, acende-se uma lanterna e dirige-se o feixe luminoso através das fendas e observa-se a mudança de direcção da luz depois de atravessar o copo com água.



Figura 3.31 - Montagem para a verificação da refração da luz.

A formação de uma imagem por refração numa superfície esférica que separa dois meios, com os índices de refração n_1 e n_2 , está ilustrada na Figura 3.32. Nesta figura, n_2 é maior que n_1 , assim as ondas propagam-se mais lentamente no segundo meio. Neste caso (à semelhança dos espelhos) só os raios paraxiais convergem para um ponto.

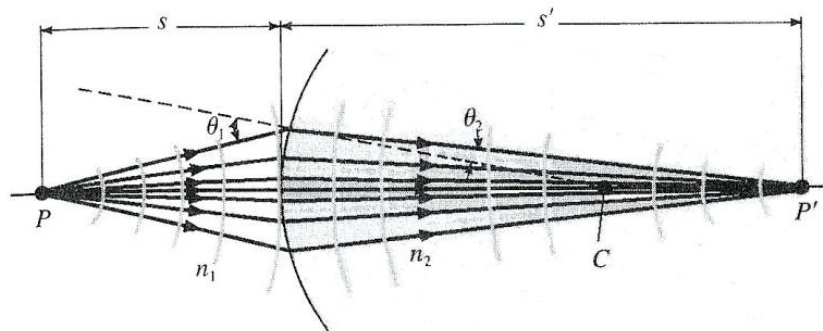


Figura 3.32 - Imagem formada pela refração numa superfície esférica entre dois meios (adaptada Tipler, 1995).

Na refração, as imagens formam-se atrás da superfície, no lado chamado de transmissão (espaço-imagem), enquanto as imagens virtuais ocorrem no lado da luz incidente (espaço objecto), na frente da superfície. As convenções de sinais utilizadas na refração encontram-se agrupadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Convenção de sinais na refração

Grandeza	Sinal	
	+	-
s	(objecto real) se o objecto estiver na frente da superfície (lado da incidência)	(objecto virtual) se o objecto estiver atrás do espelho (lado da transmissão)
s'	(imagem real) para as imagens atrás da superfície (lado da transmissão)	(imagem virtual) para as imagens na frente da superfície (lado da incidência)
r, f	se o centro de curvatura estiver no lado da transmissão	se o centro de curvatura estiver no lado da incidência

As lentes são, sem qualquer dúvida, os dispositivos ópticos mais comuns e em termos gerais, uma lente é um elemento que actua por refração, introduzindo descontinuidades no meio em que a luz se propaga inicialmente, e que reconfigura a distribuição da energia transmitida.

Apesar de terem as mais diversas formas, em conformidade com a sua utilização, nesta dissertação serão analisadas apenas as lentes delgadas (porque se pode desprezar a espessura da lente) que são aplicadas ao espectro visível.

A distância focal das lentes, quando mergulhadas no ar $n_{ar} \approx 1$, pode ser determinada a partir da equação dos fabricantes das lentes,

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.12)$$

Os focos podem ser determinados, tal como nos espelhos curvos, fazendo incidir feixes de raios paralelos ao eixo principal. Estes convergem para o foco nas lentes convergentes e divergem, como se partissem do foco, nas divergentes.

As lentes geralmente referidas por convergentes, convexas ou positivas são mais espessas no centro e tendem a fazer diminuir o raio da curvatura das frentes de onda incidentes (pressupondo-se que o índice da lente é superior ao do meio em que esta se encontra). Por outro lado, lentes côncavas, divergentes ou negativas são mais finas no centro, e facilitam um avanço mais rápido da frente de onda nessa zona, aumentando-lhe o raio da curvatura e fazendo-a divergir mais acentuadamente.

A equação $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$ - equação do espelho ou equação de Gauss - também pode ser utilizada nas lentes, tendo em atenção a convenção de sinais da tabela 3.3.

Tal como nos espelhos, também se pode localizar a imagem de um objecto, utilizando um diagrama de raios como se ilustra nas Figuras 3.33 e 3.34.

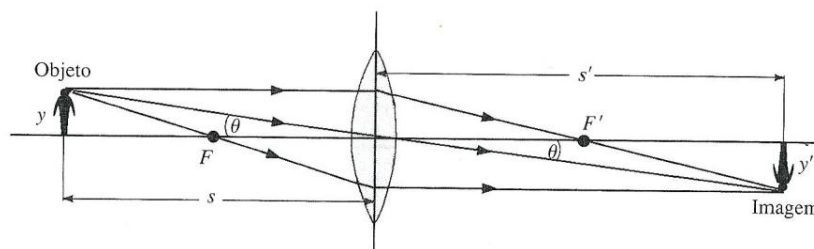


Figura 3.33 - Diagrama de raios de uma lente convergente delgada (adaptado de Tipler, 1995).

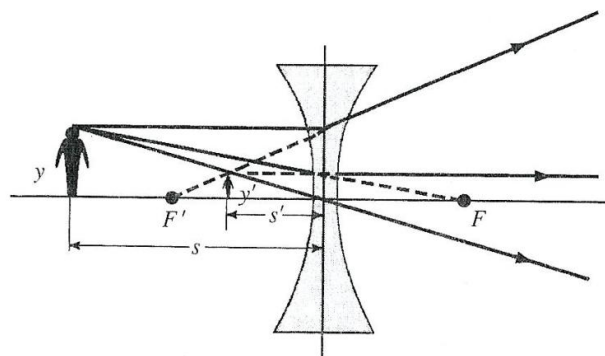


Figura 3.34 - Diagrama de raios de uma lente divergente (adaptado de Tipler, 1995).

Como os objectos são tridimensionais, também as imagens são tridimensionais, uma lente pode alterar as dimensões transversalmente e longitudinalmente. A amplificação transversal pode ser calculada pela expressão,

$$M_T = -\frac{s'}{s} \quad (3.13)$$

as lentes provocam uma inversão dos eixos transversais.

Na tabela 3.4, indicam-se as características das imagens dos objectos reais dadas por lentes delgadas:

Tabela 3.4 - Características das imagens de objectos reais dadas por lentes delgadas

Tipo de Lente	OBJECTO	IMAGEM		
	Localização	Tipo	Orientação	Tamanho relativo
Convexa	$\infty > s > 2f$	Real	Invertida	Reduzida
	$s = 2f$	Real	Invertida	Igual
	$f < s < 2f$	Real	Invertida	Ampliada
	$s = f$	$\pm \infty$		
	$s < f$	Virtual	Direita	Ampliada
Côncava	Qualquer	Virtual	Direita	Reduzida

Uma característica muito importante das lentes é a sua potência focal ou vergência, sendo positiva nas lentes convergentes e negativa nas divergentes,

$$V = \frac{1}{f} \quad (3.14)$$

a unidade de vergência é o m^{-1} e toma o nome de dioptria (D).

Actividade 3.12

Nesta actividade são utilizados três métodos diferentes para diferenciar lentes convergentes e lentes divergentes. No primeiro método constata-se que as que são mais espessas no centro e mais delgadas no bordo são convergentes e as que são delgadas no centro e espessas no bordo são divergentes. O segundo faz uso de um feixe de raios luminosos paralelos e verifica-se que no caso da lente convergente os raios convergem para um ponto (foco da lente) (Figura 3.35) e no caso das divergentes os raios luminosos divergem (Figura 3.36).

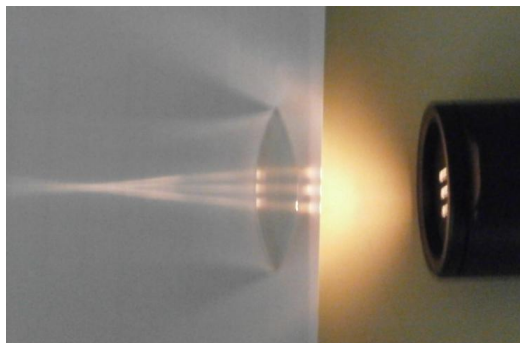


Figura 3.35 - Convergência dos raios depois de atravessarem uma lente convergente.

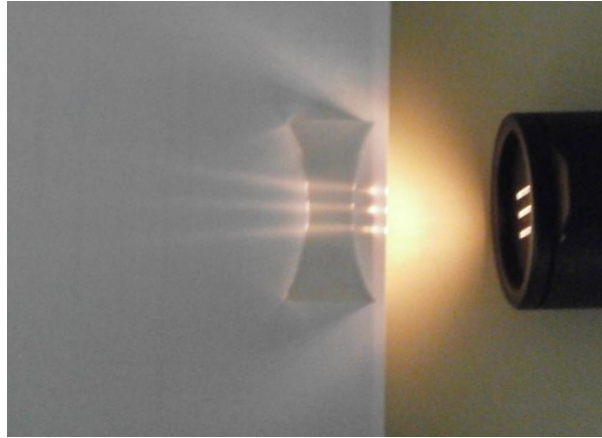


Figura 3.36 - Divergência dos raios depois de atravessarem uma lente divergente.

No terceiro método colocam-se as lentes sobre um texto e afastam-se de seguida alguns centímetros e observa-se que a lente convergente aumenta o tamanho das letras do texto (Figura 3.37) e a lente divergente diminui o tamanho das letras desse texto (Figura 3.38).



Figura 3.37 - Aumento do tamanho das letras utilizando uma lente convergente.

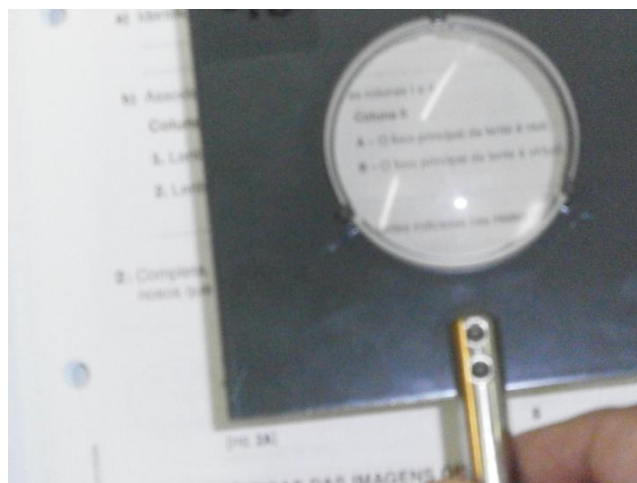


Figura 3.38 - Diminuição do tamanho das letras utilizando uma lente divergente.

Actividade 3.13

Nesta actividade estudam-se as imagens obtidas através das lentes convergentes e divergentes.

Coloca-se uma lente convergente entre uma vela acesa e o alvo (parede da sala, papel vegetal ou simples folha de papel) e, a pouco e pouco, aproxima-se a lente da vela. Inicialmente a imagem projecta-se no alvo (real), é invertida e menor que a vela (Figura 3.39). Aproximando a lente da vela, a imagem no alvo fica do mesmo tamanho, continuando invertida (nesta situação a vela está a uma distância que é igual à dupla distância focal). Continuando a aproximação da lente da vela, a imagem continua a projectar-se no alvo mas é agora maior do que o objecto (Figura 3.40). Aproximando de novo a lente da vela, verifica-se que a imagem deixa de ser projectada no alvo. Olhando para a lente, vê-se a imagem da vela como se estivesse atrás da lente; passa a ser maior que o objecto e trata-se de uma imagem virtual.



Figura 3.39 - Imagem formada por uma lente convergente com o objecto a uma distância superior a $2f$.

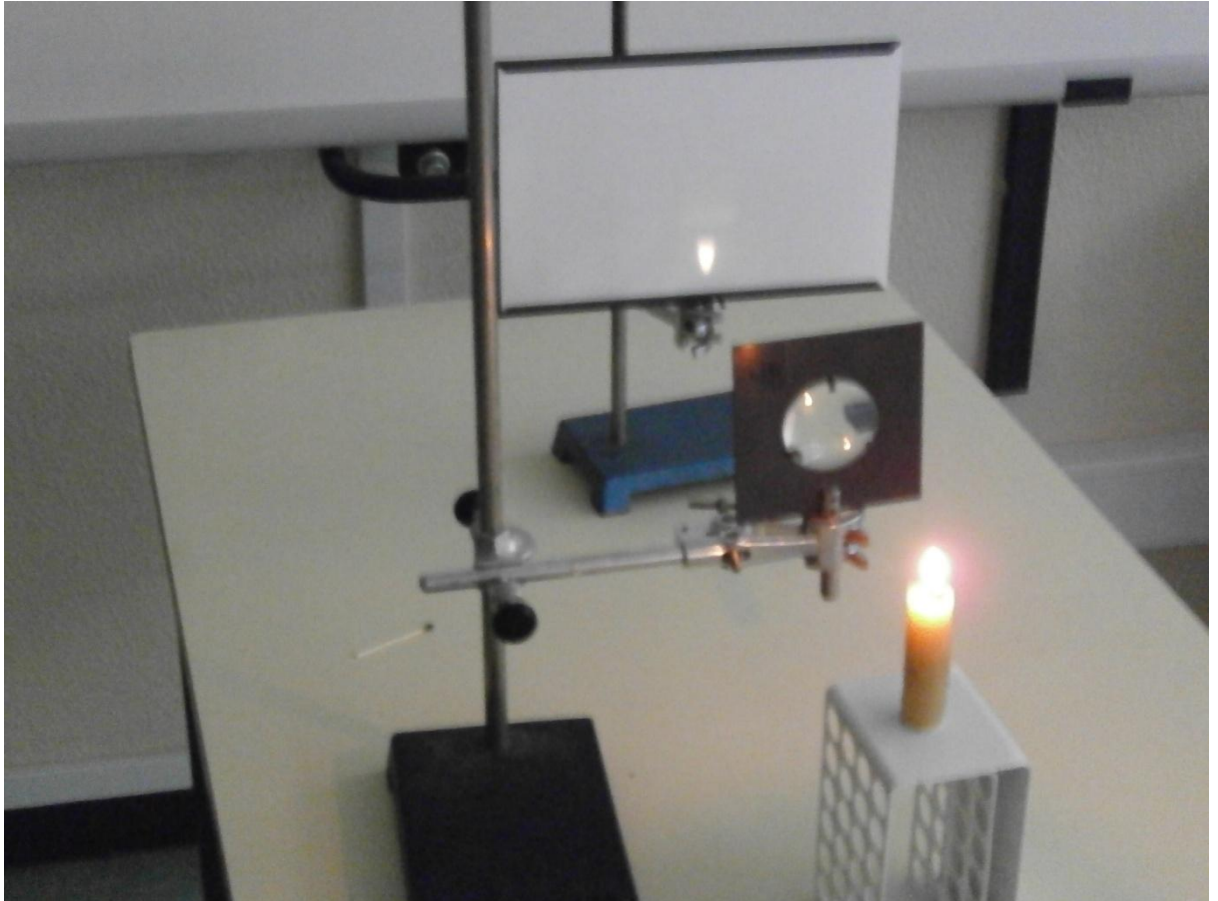


Figura 3.40 - Imagem formada por uma lente convergente com o objecto colocado a uma distância superior a f e inferior a $2f$.

Nas lentes divergentes, e independentemente da distância do objecto (vela acesa) à lente, a imagem formada é vista através da lente como se estivesse atrás dela e não se projecta num alvo (virtual). Verifica-se ainda que a imagem é direita e menor que o objecto.

Actividade 3.14

Nesta actividade os alunos constroem uma lupa (lente convergente) enchendo um frasco de vidro com água e rolando o frasco sobre um jornal verificam que as letras aumentam de tamanho (Figura 3.41).



Figura 3.41 - Lupa construída pelos alunos.

Coloca-se uma folha de papel virada para o Sol (ou um candeeiro afastado) e uma lente convergente para que se forme um ponto luminoso sobre a folha. Mede-se depois a distância entre esse ponto e o centro da lente e o valor obtido é igual à distância focal da lente utilizada. O ponto luminoso formado coincide com o foco da lente.

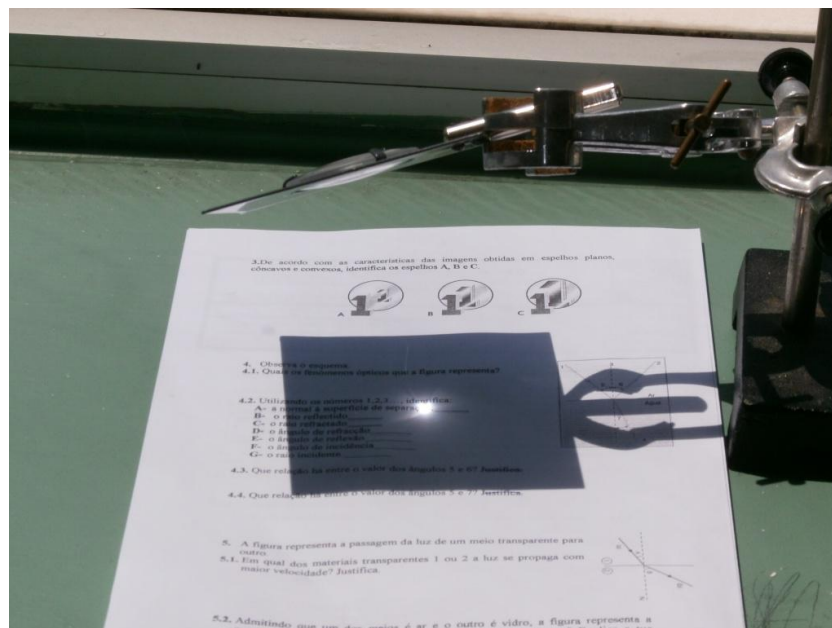


Figura 3.42 - Determinação da distância focal de uma lente.

3.4 Estrutura do olho humano

O instrumento óptico mais importante é o olho, cujo esquema está representado na Figura 3.43. A luz entra no olho através de uma abertura variável, a pupila, e é focalizada pelo sistema córnea-cristalino na retina. Esta película é constituída por fibras nervosas que recobrem a superfície posterior do olho. A retina contém estruturas sensíveis à luz, os bastonetes e os cones que recebem a imagem e transmitem a informação, através do nervo óptico, para o cérebro.

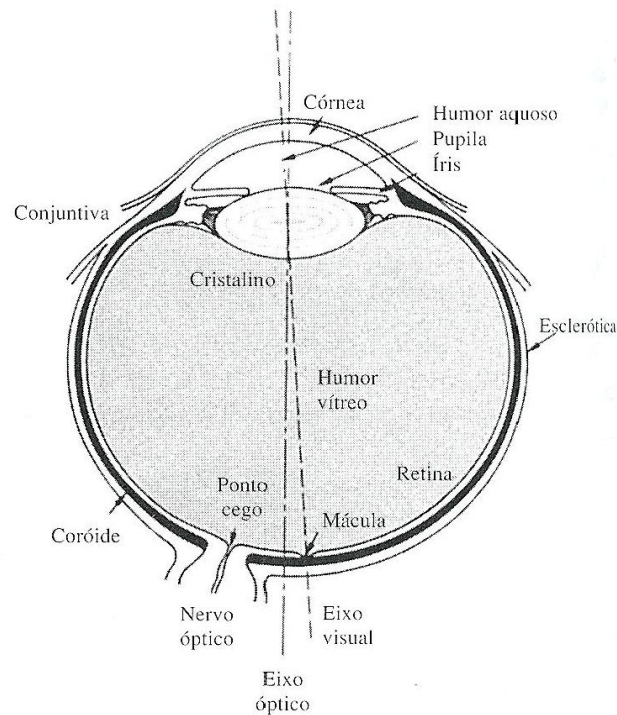


Figura 3.43 - O olho humano (adaptado de Hecht, 2002).

O olho é constituído por uma massa gelatinosa de forma quase esférica (24 mm de fundo por cerca de 22 mm de largura), contida num invólucro resistente mas flexível, a esclerótica. Com excepção da zona frontal, a córnea, que é transparente, a esclerótica é branca e opaca. A luz que atravessa a córnea passa por uma câmara cheia de um líquido claro, aquoso, com o nome de humor aquoso. Imerso no líquido encontra-se um diafragma com o nome de íris que serve de diafragma de abertura, controlando a quantidade de luz que penetra no olho através da abertura central, a pupila. Constituída por músculos circulares e radiais, a íris pode aumentar ou diminuir o diâmetro da pupila desde 2 mm (em luz muito intensa), até cerca de 8 mm (na escuridão).

Imediatamente por trás da íris encontra-se o cristalino. O cristalino, que tem a forma de um feijão (9 mm de diâmetro por 4 mm de espessura), é um corpo complexo, estratificado e fibroso, envolvido por uma membrana elástica. Esta lente é bastante flexível, embora essa flexibilidade diminua com a idade. O cristalino é uma lente de potência variável através de

variações de forma. De uma forma simplificada, pode-se dizer que esta lente dupla tem o centro óptico 17,1 mm à frente da retina, o que corresponde a uma potência de 60 D.

No interior da parede espessa da esclerótica existe uma outra camada que é a coróide. A coróide absorve a luz directa, e tem um papel análogo ao do revestimento preto interior de uma máquina fotográfica.

Uma fina camada de células receptoras de luz cobre grande parte da coróide: é a retina.

O olho humano contém dois tipos de células foto-receptoras: os cones e os bastonetes. Os bastonetes são estruturas extraordinariamente sensíveis, sendo no entanto incapazes de distinguir a cor, e as imagens a que dão origem são mal definidas. Os cones dão origem a imagens coloridas e bastantes detalhadas, sendo, porém, pouco sensíveis a níveis reduzidos de intensidade luminosa.

O olho consegue focar rapidamente imagens a diferentes distâncias. Assim, o sistema, que constitui o olho, tem que fazer a acomodação de forma rápida e eficiente. Designa-se por ponto remoto, a maior distância que é possível ver com nitidez e ponto próximo a menor distância, para a qual a acomodação do cristalino ainda permite ver com nitidez. O ponto próximo varia com a idade (podendo ir de cerca de 7 cm nas crianças aos 200 cm nas pessoas de 60 anos), no entanto considera-se como valor padrão a distância de 25 cm.

Quando a imagem de um objecto se forma sobre a retina, a visão é considerada normal, porém, quando o foco imagem não se encontra na retina, o olho é amétrope. As ametropias são devidas a alterações anómalas a nível do mecanismo de refacção ou, mais frequentemente, a alterações da distância entre o cristalino e a retina.

As duas ametropias mais frequentes são a hipermetropia e a miopia.

A hipermetropia ocorre quando a vergência do olho é insuficiente e a imagem é focada atrás da retina. Uma pessoa com este defeito de visão pode ver com facilidade objectos distantes, mas tem dificuldade em ver com clareza objectos próximos. Corrige-se com lentes convergentes.

A miopia é causada pelo excesso de curvatura da córnea. Os raios paralelos de um objecto distante convergem num ponto em frente à retina. Corrige-se com lentes divergentes.

Actividade 3.15

Nesta actividade simula-se o olho humano utilizando uma vela, um balão de vidro cheio de água, um alvo e uma lente de 5 D (Figura 3. 44). A lente é ajustada de maneira que se forma uma imagem nítida na superfície posterior do balão, que pode ser captada no alvo.



Figura 3.44 - Simulação do funcionamento óptico do olho normal.

Substituindo a lente por outra de 10 D, a imagem é formada à frente do alvo, esta situação corresponde à visão “curta” ou míope.

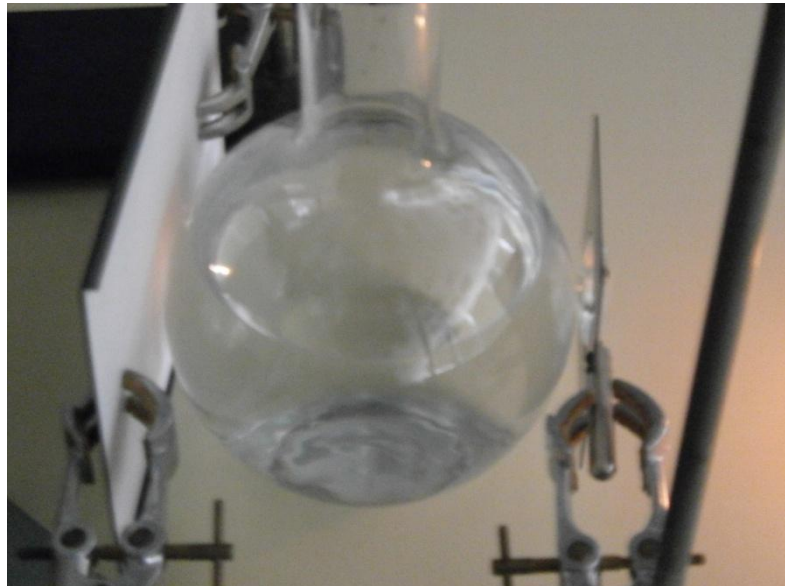


Figura 3.45 - Simulação do funcionamento óptico do olho míope.

4. Conclusões

Actualmente é inquestionável que o professor deve abandonar o ensino por transmissão e tutelar, assumindo cada vez mais um papel de moderador e facilitador do processo de ensino e aprendizagem. Para a interiorização do conhecimento científico, devem ser utilizadas diversas estratégias, nomeadamente: trabalho experimental, resolução de problemas, simulações utilizando as tecnologias de informação e comunicação...

A primeira parte deste projecto incidiu sobre a produção e transmissão do som. Foram seleccionadas diferentes actividades para comprovar a associação de uma vibração à produção de sons, nomeadamente: vibração de um diapasão e da pele de um tambor. Dada a relevância para a compreensão da amplificação do som nos instrumentos musicais com caixa foi verificado o fenómeno da ressonância, utilizando dois diapasões com a mesma frequência.

O estudo dos fenómenos sonoros e luminosos deverá ter por base uma análise geral dos fenómenos ondulatórios. Utilizando molas, foi possível diferenciar ondas longitudinais e ondas transversais e verificar as variações periódicas de algumas características das ondas.

As características das ondas sonoras foram analisadas, utilizando programas informáticos que permitiram o funcionamento do computador como osciloscópio e com microfones ligados a calculadoras gráficas. Deste modo, foi possível determinar a frequência da onda sonora produzida por um diapasão e, utilizando material de uso corrente, explicar de forma aproximada o funcionamento de um microfone.

Os alunos determinaram a velocidade do som no ar de três formas. Na primeira utilizaram um microfone e, com o software adequado, determinaram o tempo que o som leva a percorrer determinado percurso. Nas outras duas foram propostas maneiras de determinar a velocidade do som, recorrendo à formação de ondas estacionárias no interior de tubos com uma extremidade fechada. Numa delas utilizou-se um tubo de ensaio, serradura e um apito de futebol. Assim, utilizando material de baixo custo e disponível, foi possível realizar uma experiência de extrema importância quando se estudam ondas sonoras. A decomposição dos sons complexos em sons puros de várias frequências foi feita com recurso ao computador. Os resultados obtidos, em qualquer das actividades, ficaram muito próximos dos valores tabelados para a velocidade do som no ar.

O interesse dos alunos por música e o facto de alguns deles tocarem instrumentos musicais permitiu a análise dos atributos do som (altura, intensidade e timbre), utilizando fios de pesca com diferentes espessuras, um violino e um trompete. Nestas actividades foi também importante o recurso às tecnologias da informação para recolha de informações sobre as ondas sonoras produzidas pelos diferentes instrumentos musicais.

O fenómeno da reflexão do som foi identificado com recurso a tubos de PVC e placas reflectoras. No caso da refacção foram utilizados balões cheios de diferentes gases, um gerador de sinais e um microfone ligado a uma calculadora gráfica. Fez-se ainda uma análise da difracção do som e identificou-se esse fenómeno recorrendo às diferentes alturas dos sons produzidos por instrumentos musicais variados.

O estudo da sensibilidade do ouvido humano a diferentes sons e o espectro sonoro foi conseguido fazendo uso de um programa que permitiu a utilização do computador como gerador de sinais sinusoidais de diferentes frequências.

Os fenómenos luminosos foram explorados inicialmente através da análise da propagação rectilínea da luz e da formação de sombras. Nestas actividades foram utilizados materiais de fácil acesso e utilização, nomeadamente: lanternas, cartolinas e bolas de pingue-pongue.

A reflexão da luz foi verificada de uma forma simples através da utilização de vidros, alfinetes e o recurso a alguma geometria básica que os alunos demonstraram dominar. As características das imagens obtidas num espelho plano foram exploradas utilizando o mesmo tipo de material e para a exploração das imagens formadas em espelhos curvos utilizaram-se colheres. A formação de imagens reais foi conseguida recorrendo a um espelho côncavo e ao quadro do laboratório e aproveitou-se também para explorar o conceito de imagem virtual como o de “imagens que não podem ser projectadas num alvo”.

A colocação de um prego parcialmente imerso numa mistura de água e óleo permitiu observar a refacção da luz. As diferenças entre as lentes convergentes e divergentes foram estabelecidas, utilizando feixes de raios luminosos e através da variação do tamanho da letra de um texto quando sobre ele são colocadas diferentes lentes. Os alunos construíram uma lupa rudimentar e as imagens obtidas com uma lente convergente foram exploradas de forma semelhante às das formadas com um espelho côncavo.

Foi ainda construído um modelo do olho humano e analisados os defeitos de visão e as formas de os corrigir.

Neste projecto foram realizadas diferentes actividades e constatou-se uma elevada motivação, participação e concentração por parte dos alunos. No entanto, para que esta metodologia resulte numa aprendizagem significativa, o professor deve dominar os conteúdos científicos a leccionar, as tecnologias e equipamentos a utilizar e possuir o à vontade e destreza laboratorial para propor a realização de actividades experimentais. Para além disso, o conceito de disciplina em sala de aula deve sofrer uma alteração e ter em conta que os alunos têm necessidade de se movimentar ao realizarem trabalhos de grupo e interagir entre si, sendo porventura as aulas menos silenciosas.

Tenho a convicção que a estratégia utilizada contribuiu para uma alteração da visão que os alunos têm da Física e permitiu-lhes explorar e desenvolver algumas ideias e a consolidar o próprio conhecimento.

No desenvolvimento das actividades, tive em conta as limitações de tempo e procurei responsabilizar os alunos na condução do processo para que se rentabilizasse ao máximo o escasso tempo disponível. Em todas as actividades procurou-se que os alunos expusessem as suas ideias, observassem, analisassem e tirassem conclusões conducentes à aquisição do conhecimento científico. Procurei, ainda, motivar e captar os alunos para áreas de Ciências e Tecnologia.

Concluo que, embora as actividades tenham sido desenvolvidas com turmas relativamente pequenas, nada impede que sejam realizadas em turmas mais numerosas e que o material produzido possa ser utilizado por outros professores adequando-o ao seu contexto escolar.

Esta tese foi elaborada no âmbito do Clube de Ciências Pêro da Covilhã.

5. Bibliografia

- [1] Alfonso,A.B., Florêncio, A. (2007). *Uma discussão sobre as densidades de energia em ondas mecânicas unidimensionais*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://physicsact.wordpress.com/2007/11/25/uma-discussao-sobre-as-densidades-de-energia-em-ondas-mecanicas-unidimensionais/>
- [2] Almeida,G. (1997). *Sistema Internacional de Unidades*. Lisboa: Plátano Editora
- [3] Alonso,M., Finn,E. (1981). *Física um curso universitário*. São Paulo: Editora Edgard Blucher
- [4] Andrade,J.A., Lopes,N.,Carvalho,W. (2009). *Uma análise crítica do laboratório didático de Física: A experimentação como uma ferramenta para a cultura científica*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://www.fae.ufmg.br/abrapec/viempec/7enpec/pdfs/1161.pdf>
- [5] Annequin et Boutigny (1973). *Cours de Physique - Préparation aux grandes Écoles scientifiques - Optique*. Paris: Vuibert
- [6] Araújo,M.S.T., Abib,M.L.V.S. (2003) *Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades*, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, n. 2, p.176-194
- [7] Berty,J., Escant,A., Marchand, P. et al (1974). *Physique Pratique, Tome 3, Optique*. Paris: Vuibert
- [8] Bloomfield, L.A. (1997). *How Things Work - The Physics of Everyday Life*. New York: John Wiley & Sons Inc
- [9] Bramand, P., Comte, M.J., et al (2008). *Physique Chimie 3^e. Collection Durandea*. Paris: Hachette Education
- [10] Bramand, P., Comte, M.J., et al (2008). *Physique Chimie 4^e. Collection Durandea*. Paris: Hachette Education
- [11] Cachapuz,A.F. (2000). *Perspectivas de Ensino*. Porto: Centro de Estudos de Educação em Ciência
- [12] Cremilde,C., Valadares,J. et al (2003). *Sustentabilidade na Terra*. Lisboa: Didática Editora
- [13] Cavalcante,M.A. (2001). *Uma oficina de física moderna que visa a sua inserção no ensino médio*. Cad. Cat. Ens. Física, v. 18, n. 3, p 297-315

- [14] Cavalcante, M.A., Tavoraro,C.R. *Ondulatória e acústica através de experimentos assistidos por computador*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/atas/posteres/po51-39.pdf>
- [15] Debon,P., Ducourant,D., Portal,L., Ruffenach,M. (2006). *Physique Chimie 5^e. Collection Dirand. Paris: Bordas*
- [16] Dequin,J., Jourdain,J. e Poncelet,M. (1986). *Sciences Physiques 6^e. Collection Dirand. Paris: Bordas*
- [17] Ezrailson,C.,Lillie,D.,Hainen,N., Zike,D. (2002). *Waves, Sound and Light*. New York: Glencoe: McGraw-Hill
- [18] Faria,A.,Domingues,L.,Ribeiro,L.,Ribeiro,M. (1995). *CFQ-Física 8^o Ano*. Lisboa: Raiz Editora
- [19] Fernandes,M.,Graça,O., Santos,R. (1999). *Ciências Físico-Químicas- Física 8^o Ano*. Lisboa: Lisboa Editora
- [20] Ferreira, J.A., Franco (1995), S. *Conceitos Elementares de Óptica Geométrica e sua Aplicação à Óptica da Visão*. *Gazeta da Física*, 18, p. 6-11
- [21] Fortier,D.(1992). *Les Mondes Sonores*. Paris: Cité des Sciences et de l'Industrie, Press Pocket
- [22] Freeman, M.H. (1990). *Optics. Tenth Edition*. London: Butterworths
- [23] French,A.P. (1974). *Vibraciones e ondas*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- [24] Halliday,D.,Resnick,R.,Walker,J.(2009) *Fundamentos de Física 2*. 8^a Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora
- [25] Hecht,E. (2002). *Óptica. 2.^a Edição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian
- [26] Hodson,D. (1996) *Practical work in school science: exploring some directions for change*. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n. 7, p. 755-760
- [27] Hone,E., Joseph,A., Victor,E. (1971) *A Sourcebook for Elementary Science, Second Edition*. New York: Harcourt Brace Jovanovich, Inc.
- [28] Leipp, E. (1980). *Acoustique et Musique*. 3^{ème}. Paris: Masson
- [29] Maciel,N., Miranda,A. (1999). *Eu e a Física 8^o Ano*. Porto: Porto Editora
- [30] Martins,A. (1996). *Física em Temas 8^o Ano*. Porto: Porto Editora
- [31] Novak,J., Gowin,D. (1996). *Aprender a aprender*. Lisboa: Plátano, Edições Técnicas

- [32] Parsons,A. (1992). *O som*. Lisboa: Livros do Brasil
- [33] Pereira,A., Gonçalves,C. (1996). *Eu gosto de Física 8º Ano*. Lisboa: Texto Editora
- [34] Pires, I., Ribeiro, S. (2003). *Sustentabilidade na Terra*. Lisboa: Constância
- [35] Prévost,V., Richoux,B. (2010). *Physique Chimie 2^e*. Paris: Nathan
- [36] Ramalho, M., Mendonça,L. (1996). *Física no mundo em transformação*. Lisboa: Texto Editora
- [37] Richards,R.(1992). *101 Expériences Amusantes*. Paris: Librairie Gründ
- [38] Rival,M. (1998). *Les grandes expériences scientifiques*. Paris: Seuil
- [39] Rodrigues, M., Dias,F. (2001). *Ciências na nossa vida. Sustentabilidade na Terra*. Porto: Porto Editora
- [40] Rossing,T. (1989). *The science of sound*. 2^{end}. New York: Adisson Wesley Publishing Company
- [41] Saab,S., Cássaro,F., Brinatti,A. (2005). *Laboratório caseiro: tubo de ensaio adaptado como tubo de Kundt para medir a velocidade do som no ar*. Cad. Bras. Ens. Física, v.22, n.1, p 112-120
- [42] Salgueiro,L., Ferreira,J.G. (1991) *Introdução à Biofísica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian
- [43] Sallaberry, J.C. (2004). *Dynamique des représentations et construction des concepts scientifiques*. Paris: L´Harmattan
- [44] Schul,A., Maurel,H. (2010). *Le labo des sons et des lumières*. Paris: Pommier
- [45] Séré, M.G. (2003). *O papel da experimentação no ensino da Física*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/9897/9231>
- [46] Shapiro,B. (1994). *What children bring to light - a constructivist perspective on children´s learning in science*. New York: Teachers College Press
- [47] Silva,D.M. (2008). *Física e Química A . 11º Ano*. Lisboa: Lisboa Editora
- [48] Taylor,B., Leplae-Couwez,C. (1993). *Pleins feux sur la lumière*. Paris: Éditions Gamma
- [49] Taylor,B., Leplae-Couwez,C. (1993). *Pleins feux sur le son*. Paris: Éditions Gamma
- [50] Tipler, P. (1995). *Física- Ótica e Física Moderna*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC
- [51] Unesco (1973). *New Unesco source book for science teaching*. Paris

- [52] VanCleave, J. (1993). *Física para Jovens*. Lisboa: Publicações Dom Quixote
- [53] Ventura, G. et al (2008). *11 F Física e Química A*. Lisboa: Texto Editora
- [54] *Acoustics/Sound of speed*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: http://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Sound_Speed
- [55] *Determinação da velocidade do som no ar*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: http://www.fis.uc.pt/data/20032004/apontamentos/apnt_115_10.pdf
- [56] *Ensino médio. Física: experimentos práticos*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/115/browse?type=title>
- [57] *Experimentos de física para o ensino médio e fundamental com materiais do dia-a-dia*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/>
- [58] *Mesure de la vitesse du son dans l'air et dans un metal*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: http://www.lepla.edu.pl/fr/modules/Activities/m32/files/PDF_SONIC_SPEED.pdf
- [59] *Mode de vibration transversal dans un fil tendu*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://physique.coursgratuits.net/mecanique-ondulatoire/mode-de-vibration-transversal-dans-un-fil-tendu.php>
- [60] *Propriétés ondulatoires du son*. Acedido em: 30 de Maio de 2011 em: <http://eurekalia.umh.ac.be/sitepedago/fichierspdf/Propri%E9t%E9sondul.pdf>
- [61] *Ressonâncias e a produção da voz*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: <http://w3.ualg.pt/~rguerra/Acustica/ressonancia.pdf>
- [62] *Som e Acústica. Segunda parte: natureza ondulatória do som*. Acedido em 30 de Maio de 2011 em: http://www.ifsc.usp.br/~donoso/fisica_arquitetura/13_som_acustica_2.pdf