A FÍSICA ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS

Volume II

Termodinâmica
Ondulatória
Óptica

Jucimar Peruzzo

A FÍSICA ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS

Volume II

Termodinâmica, Ondulatória e Óptica

.

.

Jucimar Peruzzo

A FÍSICA ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS

Volume II

Termodinâmica, Ondulatória e Óptica

1ª edição

Irani, SC
Edição do Autor
2013

Copyright © 2013 by Jucimar Peruzzo

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, por qualquer meio eletrônico, mecânico, fotográfico, gravação, etc., sem a autorização prévia do autor.

Impresso no Brasil
Printed in Brazil

Ficha Catalográfica

Peruzzo, Jucimar
A Física Através de Experimentos: Termodinâmica, Ondulatória e Óptica. V.II / Jucimar Peruzzo. Irani (SC): 2013.

377p.
Bibliografia

1. Física Geral. 2. Física Experimental. 3. Experimentos de Física. 4. Laboratório de Física. I. Título.

ISBN: 978-85-913398-6-0 CDD: 530

Editor: Jucimar Peruzzo
E.E.B. Dom Felício C. C. Vasconcelos
E.E.B. Isabel da Silva Telles
Irani / SC
e-mail: jucimarperuzzo@yahoo.com.br

.

Dedico este livro a todos os meus alunos.

.

.

A beleza existe em todo lugar. Depende do nosso olhar, da nossa sensibilidade, da nossa consciência, do nosso trabalho e do nosso cuidado. A beleza existe porque o ser humano é capaz de sonhar.
Moacir Gadotti

Liberdade é um dos presentes mais preciosos que Deus deu ao homem. A liberdade é como a honra: podemos arriscar a nossa vida por ela.
Dom Quixote de La Mancha

Não importa se a gente acredita em Deus.
O mais importante é saber se Deus acredita na gente.
Mario Quintana

Aquele que nunca cometeu erros nunca tentou nada de novo.
Albert Einstein

.

Prefácio

Desde o início de sua existência o ser humano busca respostas para explicar e compreender os fenômenos da natureza. Inicialmente suas causas foram atribuídas à vontade dos deuses. No entanto, com o tempo, ele foi procurando entender os fenômenos de maneira racional.

Embora os fenômenos físicos e suas tentativas de compreensão remontem à antiguidade, a física como ciência, de modo como a conhecemos atualmente, surgiu no século XIX. Nesse período e nos séculos anteriores houve um grande desenvolvimento científico, o que fez com que as ciências naturais se dividissem em física, química, biologia, entre outras.

O objetivo da física é compreender os fenômenos mais elementares da natureza. Neste caso, elementar significa mais básico, mas não, necessariamente mais simples. A física estuda fenômenos que vão desde as partículas constituintes do átomo até grandes estruturas no universo, como as galáxias, ou o próprio universo como um todo. Muitos fenômenos são tão complexos que a física não consegue estudá-los individualmente e utiliza-se de aproximações estatísticas para isso.

A física é muitas vezes considerada uma ciência abstrata, que explica os fenômenos que ocorrem somente em laboratórios. No entanto, estamos rodeados de fenômenos físicos na natureza e cada vez mais na vida quotidiana altamente tecnológica. Na sociedade contemporânea o conhecimento científico é cada vez mais valorizado, devido principalmente à crescente influência que a tecnologia exerce no dia-a-dia humano. Por isso, é inconcebível que na educação formal atual o aluno fique excluído do saber científico.

Nos últimos anos a escola tem sido criticada pela baixa qualidade do seu ensino, não conseguindo preparar os estudantes para o mercado de trabalho

e para a universidade. As aulas de ciências, e em especial as de física, estão muito aquém do ideal. Os resultados quanto à aprendizagem pelos alunos, em sua grande maioria, não são nada animadores. O desempenho é baixo e há pouco interesse em entendê-la. Os professores reclamam do desinteresse dos estudantes e estes, em grande maioria, se referem às aulas de física como sendo chatas, conduzidas por profissionais despreparados e que ficam falando de coisas totalmente abstratas, coisas estas que não lhes atraem.

No ensino de física em nível médio constata-se que as atividades experimentais são raramente utilizadas pela maioria dos professores. Ao tentar entender o porquê disso, encontramos diversas justificativas, tais como: falta de atividades preparadas, pouco tempo para o professor planejar e montar experimentos, recursos insuficientes para reposição e compra de equipamentos e materiais de laboratório, número excessivo de alunos por sala, despreparo do docente, etc. Diante dessa situação começamos a entender o motivo das deficiências existentes no ensino em física e na aprendizagem em geral.

Diversas pesquisas têm sido feitas a respeito do uso de experimentos no ensino de física. Segundo elas, o ensino centrado nos conceitos teóricos, sem incluir situações reais, torna a disciplina desmotivante e chata para o aluno. Nesse sentido, a atividade experimental vem como uma importante ferramenta pedagógica, apropriada para despertar o interesse dos alunos, cativá-los para os temas propostos pelos professores e capaz de ampliar a capacidade para a aprendizagem.

As ciências naturais têm em sua base a experimentação. Os fenômenos são explicados e as teorias somente têm êxito pleno se a experiência as confirmarem. A física, componente desse grupo de ciências, exerce um papel muito importante no mundo atual. Ela participa do desenvolvimento científico e tecnológico com importantes contribuições, cujas decorrências têm alcance econômico, social e político imensos.

Apesar de conter aspectos filosóficos, teóricos e matemáticos, a física é essencialmente uma ciência experimental. Portanto, a realização de experiências é uma parte essencial para o ensino de física. O uso de atividades experimentais como estratégia de ensino tem sido apontada como uma das maneiras mais frutíferas de se minimizar as dificuldades de aprender e de se ensinar física de modo significativo e consistente. Deve-se criar oportu-

nidades para que o ensino experimental e o ensino teórico se efetuem em concordância.

No entanto, as dificuldades para a prática de atividades experimentais em sala de aula são muitas, como foi comentado anteriormente. Muitos professores até tentam enfrentar esses problemas improvisando aulas práticas e demonstrações com materiais improvisados. Alguns acabam tendo êxito, mas a grande maioria acaba cansando diante do grande trabalho e dos resultados insatisfatórios obtidos.

Com o objetivo de contribuir para a melhoria no ensino de física, enfatizando as atividades experimentais, foi desenvolvido este livro, com cerca de 190 experimentos propostos de termodinâmica, ondulatória e óptica, o qual é destinado à estudantes de física (em nível médio e superior), ao público em geral e principalmente aos professores de ciências e física.

Os experimentos aqui apresentados utilizam materiais, em sua maioria simples e de fácil obtenção. Além disso, eles não necessitam de um ambiente próprio para serem realizadas, podendo serem efetuados na própria sala de aula (se tiver uma sala ou laboratório próprio, melhor).

Ao descrever cada experimento procurou-se fazer um roteiro mais aberto, mas que possa ser compreendido, de modo que cada experimentador elabore e ajuste certos detalhes à seu critério. Na maioria das vezes pode-se obter resultados semelhantes montando o experimento de uma outra forma, utilizando materiais diferentes dos citados. A idéia é essa mesma, pois a verdadeira experimentação se realiza dessa forma, e não seguindo roteiros do tipo "receita pronta". Em alguns experimentos quantitativos foram colocados dados numéricos de experimentos realizados pelo autor, para facilitar a compreensão do mesmo por parte do leitor.

Os experimentos aqui descritos são baseado em livros, sites e artigos científicos, os quais estão listados nas referências, e foram aprimorados pelo autor (ao seu gosto) em sua prática docente em diversos anos, muitos deles com a ajuda de seus alunos. Evitou-se a apresentação de experimentos mais complexos e trabalhosos de se realizarem, pois isso certamente dificultaria a sua execução em sala de aula, principalmente devido ao grande tempo que seria gasto para isso.

Em muitos livros e manuais de experimentos existentes atualmente, está

descrita a montagem do experimento, mas que nem sempre é seguida do que ocorre e o porquê de tais acontecimentos. Isso, muitas vezes, acaba afugentando o experimentador do desafio de estar realizando ou propondo tal experimento. Por isso, neste livro, em todos os experimentos procurou-se fazer uma análise detalhada dos fenômenos ocorridos e dos resultados obtidos, para que o leitor possa ter mais confiança na sua prática. No entanto, inicialmente induz-se o leitor a uma realização própria do experimento, de modo que ele obtenha resultados, desenvolva uma análise e tire as suas conclusões.

Com poucas exceções, os experimentos propostos visam descrever e ilustrar fenômenos e leis físicas, sem importar-se muito com as aplicações práticas. Neles procurou-se não dar muito ênfase nos procedimentos matemáticos, mas sim, estabelecer relações de caráter qualitativo e semi-qualitativo. Algumas incursões matemáticas desenvolvidas em alguns experimentos quantitativos são próprias do autor deste livro, o que não quer dizer que seja a única ou a melhor. Por isso, é importante um empenho do leitor e do professor para a utilização de outras fontes bibliográficas e a dedicação para criar variantes dos experimentos aqui propostos bem como o de novos, com o objetivo de criar o "seu experimento".

Espera-se que o livro não contenha experimentos que possa comprometer a realização da prática experimental. Isso porque é comum que a decepção com um experimento que não funcionou adequadamente possa levar o experimentador a perder o interesse por esse tipo de atividade. Além disso, salienta-se que, muitas vezes a investigação de um experimento que não "deu certo"pode ser muito mais rica para o processo de ensino-aprendizagem do que o experimento perfeito. É recomendável que o professor sempre faça o experimento antes de levá-lo para sala de aula ou propô-lo para os alunos. Alguns imprevistos ou detalhes mínimos podem comprometer o seu êxito.

As atividades experimentais favorecem o despertar para o maravilhoso mundo da ciência e suas aplicações. Ter interesse e dedicar tempo à esse trabalho é uma aventura muito emocionante. As aulas práticas certamente vão despertar a atenção dos alunos e fazê-los compreender melhor os porquês das coisas, além de desenvolver um pensamento questionador e crítico.

Não aceitar a importância no ensino das aulas experimentais significa destituir o conhecimento físico de seu contexto, reduzindo esta ciência a um

sistema abstrato de definições, leis e fórmulas matemáticas. A física é muito mais do que isso. É uma atividade intelectual extremamente viva e interessante.

Jucimar Peruzzo

Estrutura dos Experimentos Propostos

Todos os experimentos propostos neste livro tem uma mesma apresentação:

Título

Evidencia rapidamente o assunto abordado.

Objetivo(s)

Indica o que se pretende atingir com a realização do experimento proposto.

Material Utilizado

Informa os materiais e/ou equipamentos necessários para a realização do experimento. Alguns materiais sempre podem ser substituídos por outros similares ou equivalentes.

Montagem e Procedimento

Orienta na montagem e na realização do experimento.

Análise e Explicação

Explica em detalhes os resultados do experimento, dando uma boa base conceitual e matemática.

Sumário

1 TERMODINÂMICA **1**

1.1 Termômetro de Galileu 1
1.2 Expansão de um Gás 4
1.3 Deformação de uma Garrafa PET 1 6
1.4 Deformação de uma Lata 7
1.5 A Chama que Suga a Água 9
1.6 Chafariz Térmico 11
1.7 Formação de uma Nuvem 13
1.8 Volume de Ar em função da Temperatura 15
1.9 Densidades de Gases 17
1.10 Ebulidor de Franklin 19
1.11 Pressão Interna de uma Lâmpada Fluorescente 20
1.12 Balões Acoplados 23
1.13 Copo e Balão 26
1.14 Enchimento de um Balão 27
1.15 Funcionamento dos Pulmões 29
1.16 Lei de Charles e Gay-Lussac 30
1.17 Lei de Boyle-Mariotte 33
1.18 Transformação Isotérmica 36
1.19 Lei de Charles 38
1.20 Transformação Isovolumétrica 41
1.21 Fumaça que Desce 42
1.22 Dilatação Linear 44
1.23 Dilatação de uma Dupla Face 46

1.24 Dilatômetro 48
1.25 Cofre de Gravezande 50
1.26 Anel de Gravezande 52
1.27 Dilatação de Líquidos 54
1.28 Termômetro na Água Quente 58
1.29 Propagação de Calor por Condução 59
1.30 Propagação de Calor por Convecção 62
1.31 Correntes de Convecção 1 63
1.32 Correntes de Convecção 2 65
1.33 Convecção de Líquidos 67
1.34 Vela em Queda Livre 69
1.35 Banho-Maria e Paradoxo 71
1.36 Bolhas na Água em Ebulição 73
1.37 Ventilação e Resfriamento 74
1.38 A Chama que se Apaga 75
1.39 Transferência de Calor e Equilíbrio Térmico 76
1.40 Sensação Térmica 78
1.41 Condutividade Térmica 1 79
1.42 Condutividade Térmica 2 81
1.43 Papel que não Queima 82
1.44 Gelo Embrulhado 83
1.45 Convecção do Ar Aquecido 84
1.46 Chamas em Rotação 86
1.47 Propagação de Calor por Irradiação 88
1.48 Balões e Transferência de Calor 90
1.49 Quantidade de Calor 92
1.50 Capacidade Térmica de um Calorímetro 94
1.51 Calor Específico de um Sólido 96
1.52 Calor Específico de um Líquido 98
1.53 Formação de Brisas 100
1.54 Temperatura e Estados Físicos 102
1.55 Estudando a Solidificação da Água 104
1.56 Ponto de Orvalho 105
1.57 Calor Latente 106

1.58 Derretendo Gelo com Sal 108
1.59 Evaporação de um Líquido 109
1.60 Resfriamento do Frasco de Aerossol 111
1.61 Sublimação 113
1.62 Calefação 1 115
1.63 Calefação 2 116
1.64 Pressão e Ponto de Ebulição da Água 118
1.65 Fervendo Água Sob Pressão 1 119
1.66 Fervendo Água Sob Pressão 2 121
1.67 Panela de Pressão 123
1.68 Atrito e Calor 124
1.69 Gelo Suspenso por um Palito 125
1.70 Efeito Tyndall 126
1.71 Fervendo o Leite e a Água 128
1.72 Acendendo uma Vela à Distância 129
1.73 Canhão de Latas 130
1.74 Aeolípile 132
1.75 Máquina a Vapor 133
1.76 Barco a Vapor 135
1.77 Tira de Borracha 137
1.78 Expansão Adiabática 138
1.79 Compressão Adiabática 140
1.80 Segunda Lei da Termodinâmica 141
1.81 Entropia 142

2 ONDULATÓRIA 145

2.1 Oscilador Harmônico Simples 145
2.2 Pêndulo Simples 148
2.3 Pêndulo Cônico 151
2.4 Pêndulo Simples e Aceleração da Gravidade 154
2.5 Pêndulo de Foucault 156
2.6 Ondas Transversais e Longitudinais 158
2.7 Ondas Sonoras e Sinais de Luz 160
2.8 Ressonância 162

2.9 Pêndulos Ressonantes 164
2.10 Anéis Ressonantes 166
2.11 Ressonância Forçada 1 168
2.12 Ressonância Forçada 2 170
2.13 Vibração de uma Taça 172
2.14 Ressonância de uma Taça 173
2.15 Telefone de Cordel 175
2.16 Ondas Estacionárias em Cordas 178
2.17 Ondas Estacionárias numa Mola 182
2.18 Velocidade de Ondas em Cordas 183
2.19 Som Emitido por um Fio Esticado 185
2.20 Rasgando um Tecido 187
2.21 Ondas Estacionárias em Tubos Abertos 188
2.22 Ondas Estacionárias em Tubos Fechados 191
2.23 Ondas Estacionárias em Tubos Fechados 2 194
2.24 Velocidade do Som no ar 196
2.25 Efeito Doppler 198
2.26 Estalos Supersônicos 202
2.27 Difração de uma Onda 204
2.28 Diapasões 206
2.29 Interferência no Diapasão 208
2.30 Interferência, Ressonância e Batimento 209
2.31 Frequência de um Diapasão 211
2.32 Timbre Sonoro 214
2.33 Amplificação de uma Onda Sonora 215

3 ÓPTICA 219
3.1 Meios Transparente, Translúcido e Opaco 219
3.2 Trajetória da Luz 221
3.3 Independência dos Raios de Luz 222
3.4 Sombra e Penumbra 223
3.5 Atração entre Sombras 225
3.6 Determinação de Alturas 226
3.7 Câmara Escura 227

3.8 Reflexão da Luz 230
3.9 Formação de Imagens no Espelho Plano 232
3.10 A Chama que Não Queima 234
3.11 Multiplicação de Imagens 235
3.12 Caleidoscópio 237
3.13 Túnel do Tempo 239
3.14 Sistema Refletor Inversor 241
3.15 Periscópio 243
3.16 Amplificação de uma Deformação Mecânica 245
3.17 Espelhos Côncavo e Convexo 247
3.18 Imagens no Espelho Côncavo 250
3.19 Imagens no Espelho Convexo 253
3.20 Distância Focal de um Espelho Esférico 255
3.21 Projeção de Imagens por um Espelho Côncavo 259
3.22 Refração da Luz 1 261
3.23 Refração da Luz 2 264
3.24 Caneta Quebrada 266
3.25 Propagação Não-Retilínea da Luz 267
3.26 Curvando um Feixe de Luz 1 268
3.27 Curvando um Feixe de Luz 2 269
3.28 Desvio Lateral da Luz 270
3.29 Índice de Refração de Sólidos 272
3.30 Reflexão Total da Luz 1 274
3.31 Reflexão Total da Luz 2 276
3.32 Ângulo Limite 278
3.33 Fibra Óptica 280
3.34 Refração e Reflexão num Espelho 282
3.35 Refração e Invisibilidade 284
3.36 Lentes Esféricas 287
3.37 Lente Esférica Divergente 291
3.38 Lente Esférica Convergente 293
3.39 Projeção de Imagens por uma Lente Convergente 295
3.40 Distância Focal de um Lente Esférica 297
3.41 Utilizando uma Lupa 299

3.42 Tipo de Óculos e Defeitos de Visão 301
3.43 Lente Cilíndrica 303
3.44 Ângulo de Visão 305
3.45 Fotografia e Olhos Vermelhos 307
3.46 Pequeno Orifício e Difração 308
3.47 Difração e Interferência da Luz 1 309
3.48 Difração e Interferência da Luz 2 312
3.49 Difração e Interferência da Luz 3 313
3.50 Anéis de Interferência 314
3.51 Mancha de Poisson 315
3.52 Ranhuras de um CD 317
3.53 Diâmetro de um Fio de Cabelo 320
3.54 Índice de Refração de Líquidos 322
3.55 Cores nas Poças de Óleo e nas Películas de Sabão 326
3.56 Ilusão de Óptica 328
3.57 Furo na Palma da Mão 329
3.58 Levitação Virtual 330
3.59 Visão Tridimensional 332
3.60 Pêndulo de Pulfrich 333
3.61 Espalhamento da Luz - As Cores do Céu 335
3.62 Decomposição da Luz 1 338
3.63 Decomposição da Luz 2 340
3.64 Disco de Newton 341
3.65 Pião de Cores 343
3.66 Disco Branco e Preto 345
3.67 Efeito Estroboscópico 347
3.68 Construindo um Arco-Íris 348
3.69 Estudo das Cores 350
3.70 Sombras Coloridas 352
3.71 Efeito Albedo 1 353
3.72 Efeito Albedo 2 355
3.73 Efeito Albedo 3 356
3.74 Polarização da Luz 357
3.75 Polaroides e Lei de Malus 360

Lista de Figuras

1.1 Termômetro de Galileu. 2
1.2 Aquecimento do tubo de ensaio contendo água, acoplado no balão. 4
1.3 Lata amassada. 7
1.4 a- Vela fixada no prato; b- Água sugada para dentro do copo. . . . 9
1.5 Chafariz térmico. 11
1.6 Nuvem na garrafa. 13
1.7 Água subindo pelo canudinho. 15
1.8 Garrafas. 17
1.9 a- A lamparina se apaga; b- Transferência de gás; c- A lamparina de apaga. 18
1.10 Ebulidor de Franklin. 19
1.11 Medindo a pressão interna de uma lâmpada. 21
1.12 Balões acoplados. 23
1.13 Balões acoplados. 24
1.14 Pressão do ar em função do volume num balão. 25
1.15 Copo e balão: a- Copo solto; b- Copo preso. 26
1.16 Balão na garrafa. 27
1.17 Esquema de um pulmão. 30
1.18 Seringa e termômetro no béquer. 31
1.19 Gráfico de $V \times T$. 32
1.20 Gás numa seringa sofrendo pressão. 34
1.21 Isoterma. 35
1.22 Tubo com água e balão. 36
1.23 Seringa e termômetro conectados no erlenmeyer com água. 39
1.24 Transformação isovolumétrica. 40

1.25 Fumaça descendo. 42
1.26 Massa suspensa no fio. 44
1.27 Dilatação de uma dupla face. 46
1.28 Dilatômetro: a- Montagem do experimento; b- Construção do ponteiro. 48
1.29 Cofre de Gravezande. 50
1.30 Anel de Gravezande. 52
1.31 Recipiente com água em banho-maria. 55
1.32 Gráfico de $V \times T$. 56
1.33 Haste metálica com percevejos sendo aquecida. 59
1.34 Chama da vela movimenta o cata-vento. 63
1.35 Correntes de convecção. 64
1.36 Líquido colorido não se mistura. 65
1.37 Latas conectadas. 67
1.38 Vela em queda livre. 69
1.39 Tubo de ensaio com água em banho-maria. 71
1.40 Lata na vasilha com água. 76
1.41 Vela dentro do tubo. 84
1.42 Velas: a- Fixadas no fundo do balde; b- Em rotação. 86
1.43 Irradiação da chama da vela. 88
1.44 Vela acesa entre uma vasilha com areia quente e outra com gelo. . 100
1.45 $T \times t$ no aquecimento da água. 103
1.46 Distribuição de Boltzmann. 110
1.47 Calefação. 116
1.48 Diagrama $p \times T$ representando a curva de ebulição. 119
1.49 Fervendo a água na seringa. 120
1.50 Diagrama de fases da água. 121
1.51 Efeito Tyndall. 126
1.52 Diagrama de fases da água. 127
1.53 Canhão de latas. 131
1.54 a- Posição dos tubos na lata; b- Aeolípile posto em funcionamento. 133
1.55 Máquina a vapor. 134
1.56 Barco a vapor. 135
1.57 Temperatura da borracha do balão. 138

1.58 Caixinhas com feijões: a- Em apenas 1 lado; b- Nos 2 lados. . . . 142

2.1 Corpo suspenso por uma mola. 146
2.2 Forças atuantes sobre a massa do pêndulo. 149
2.3 Pêndulo cônico. 151
2.4 Forças atuantes sobre a massa do pêndulo cônico. 152
2.5 Pêndulo de Foucault. 157
2.6 Ondas transversais. 158
2.7 Ondas longitudinais. 159
2.8 Laser incidindo sobre o espelho disposto sobre o balão. 160
2.9 Pêndulos acoplados. 162
2.10 Pêndulos suspensos no barbante. 164
2.11 Anéis ressonantes. 166
2.12 Jatos de ar sobre o pêndulo. 168
2.13 Pêndulos suspensos no arame. 170
2.14 Caixa de som e taça. 174
2.15 Telefone de cordel. 175
2.16 Fio esticado preso no alto falante. 178
2.17 Ondas estacionárias no fio. 179
2.18 Primeiro harmônico. 179
2.19 Segundo harmônico. 180
2.20 Terceiro harmônico. 180
2.21 Tubo sonoro aberto. 188
2.22 Três primeiras ondas estacionárias num tubo sonoro aberto. . . . 190
2.23 Tubo sonoro fechado. 191
2.24 Três primeiras ondas estacionárias num tubo sonoro fechado. . . . 192
2.25 Tubos de ensaio com colunas líquidas. 194
2.26 a- F, O_1 e O_2 fixos; b- O_1 e O_2 fixos e F deslocando-se para a esquerda. 199
2.27 F fixo e O_1 e O_2 deslocando-se para a direita. 200
2.28 Fonte em: a- Repouso; b- Movimento para a direita. 202
2.29 Difração de uma onda ao passar por uma fenda. 205
2.30 Diapasões próximos. 206
2.31 a- Interferência construtiva; b- Interferência destrutiva. 209

2.32 a- Interferência de duas ondas com frequências próximas; b- Onda resultante. 211
2.33 Fio tensionado preso no diapasão. 212
2.34 Formação de ondas estacionárias. 212
2.35 Formas das ondas correspondentes aos sons de alguns instrumentos. 215
2.36 Superfície parabólica de cartolina. 216
2.37 Som amplificado no paraboloide. 216

3.1 Feixes de luz cruzados. 222
3.2 Formação de sombra e penumbra. 223
3.3 Sombras de estacas. 227
3.4 Câmara escura. 228
3.5 Câmara escura com câmara de proteção. 228
3.6 Imagem invertida na câmara escura. 229
3.7 Luz do laser incidindo sobre o espelho. 230
3.8 Ângulo de incidência e ângulo de reflexão. 231
3.9 Espelho plano situado entre dois objetos. 232
3.10 Imagem de um objeto num espelho plano. 233
3.11 Chama que não queima. 234
3.12 Associação de espelhos planos e multiplicação de imagens. 235
3.13 Formação de imagens em 2 espelhos planos dispostos perpendicularmente entre si. 236
3.14 Estrutura interna do caleidoscópio. 237
3.15 Experimento túnel do tempo. 239
3.16 Sistema refletor inversor. 241
3.17 Formação de imagens no refletor inversor. 242
3.18 Estrutura do periscópio. 243
3.19 Feixe de laser incidindo sobre os espelhos. 245
3.20 Incidência e reflexão de luz num espelho: a- Convexo; b- Côncavo. 248
3.21 Elementos geométricos de um espelho esférico. 248
3.22 Feixes de luz incidindo num: a- Espelho côncavo; b- Espelho convexo. 249
3.23 Objeto localizado antes de C. 251
3.24 Objeto situado sobre C. 251

3.25 Objeto localizado entre C e F. 252
3.26 Objeto posicionado sobre F. 252
3.27 Objeto localizado entre F e V. 253
3.28 Formação de imagem num espelho convexo. 254
3.29 Esquema do experimento para determinação da distância focal. . . 255
3.30 Objeto e imagem num espelho esférico côncavo. 256
3.31 Anteparo, vela e espelho côncavo alinhados. 259
3.32 Projeção de imagem pelo espelho côncavo no anteparo. 260
3.33 Olhando a moeda no fundo do copo com água pelo interior do canudinho. 261
3.34 Raios de luz refletidos pela moeda: a- Passam pelo interior do canudinho; b- Não passam mais pelo interior do canudinho. 262
3.35 Objeto O e imagem O'. 263
3.36 Curvamento do feixe de luz. 264
3.37 Caneta quebrada. 266
3.38 Curvando a luz do laser. 269
3.39 Arco de luz. 270
3.40 Desvio lateral de um feixe de luz numa lâmina de faces paralelas. . 271
3.41 Incidência de luz na lâmina de vidro. 272
3.42 Incidência da luz laser na água. 274
3.43 Reflexão total da luz laser. 275
3.44 Luz do laser seguindo o jato de água. 276
3.45 O observador: a- Enxerga a cabeça do prego; b- Não enxerga mais a cabeça do prego. 278
3.46 Seção transversal de uma fibra óptica. 280
3.47 Bastão de vidro mergulhado: a- Na água; b- Em C_2Cl_4. 284
3.48 Garrafa situada no interior do copo. 285
3.49 Principais formatos de lentes esféricas. 288
3.50 Focos de lentes esféricas convergentes. 288
3.51 Focos de lentes esféricas divergentes. 289
3.52 a- Lente convergente; b- Lente divergente. 289
3.53 Formação de imagem numa lente esférica divergente. 291
3.54 Objeto localizado além do ponto A. 293
3.55 Objeto situado sobre o ponto A. 294

3.56 Objeto localizado entre A e F. 294
3.57 Objeto situado sobre F. 295
3.58 Objeto localizado entre F e o centro da lente. 295
3.59 Vela, lente convergente e anteparo alinhados. 296
3.60 Anteparo, lente, objeto e lanterna alinhados. 297
3.61 Formação da imagem na lupa. 299
3.62 Olho: a- Normal; b- Com miopia; c- Com hipermetropia. 302
3.63 Copo: a- Na vertical; b- Girado à direita; c- Girado à esquerda. . . 303
3.64 Ângulo de visão. 305
3.65 Fenômeno da difração. 309
3.66 Luz atravessando os orifícios F_1 e F_2. 310
3.67 Mancha de Poisson. 315
3.68 Luz laser incidindo no cd. 317
3.69 a- Ponto P sendo atingido por 2 feixes de luz; b- Relação trigonométrica. 319
3.70 Feixe de luz difratada incidindo na tela sob um ângulo θ com a horizontal. 320
3.71 Pedaço de cd grudado no recipiente com água. 322
3.72 Luz do laser passando pelo cd e incidindo no anteparo. 323
3.73 Reflexão, refração e interferência de um feixe de luz incidindo sobre uma poça de óleo. 327
3.74 Ilusão de óptica. 328
3.75 Espelho colocado na diagonal do cubo. 330
3.76 Pêndulo de Pulfrich. 333
3.77 Luz incidente sobre a água. 335
3.78 Decomposição da luz branca num prisma. 338
3.79 Disco de Newton. 341
3.80 Esquema do corrupio. 342
3.81 Pião de cores. 343
3.82 Pião de cores. 344
3.83 Disco branco e preto. 345
3.84 Esquema de formação do arco-íris. 349
3.85 Formação do arco-íris e observador. 350
3.86 Termômetros ao sol. 353

3.87 Orientação dos polaroides: a- A luz atravessa; b- A luz não atravessa. 357
3.88 Luz sendo polarizada. 358
3.89 Polarizador e analisador girados $90°$ entre sí. 359
3.90 Fonte de luz, polaroides e luxímetro. 360
3.91 Vetor $\vec{E}$ fazendo um ângulo θ com o eixo y do polaroide. 361
3.92 Gráfico de $I \times cos^2\theta$. 363

Lista de Tabelas

1.1 Dados de V e T. 32
1.2 Dados de P e V. 33
1.3 Tabela de Dados. 55

2.1 Dados de um pêndulo com $0,64m$ de comprimento. 155
2.2 Dados de um pêndulo com $0,176m$ de comprimento. 156
2.3 Dados de ondas estacionárias numa corda. 183
2.4 n, f, λ e v para um tubo sonoro aberto. 196
2.5 n, f, λ e v para um sonoro fechado. 197

3.1 Valores de p, p' e f para um esférico côncavo. 258
3.2 Valores de p, p' e f de uma lente plano-convexa. 298
3.3 Valores de x, y e d na difração de um fio de cabelo. 321
3.4 $I \times \theta$. 362

Capítulo 1

TERMODINÂMICA

1.1 Termômetro de Galileu

Objetivo

Construir e explicar o funcionamento de um termômetro de Galileu.

Materiais Utilizados

1 tubo de vidro ou plástico transparente fino, 1 bulbo de lâmpada incandescente (lâmpada incandescente usada na qual foi retirado o miolo) ou 1 balão volumétrico, 1 rolha (de preferência de borracha), 1 recipiente com água, 1 vela, 1 pedra de gelo.

Montagem e Procedimento

Passe a ponta do tubo pela rolha e fixe-o no bulbo da lâmpada, vedando completamente os possíveis vazamentos. Coloque o tubo verticalmente dentro de um recipiente com água, inicialmente fazendo com que uma certa quantidade de água entre no tubo, como mostra a Fig.(1.1).

Em seguida aqueça o bulbo com as próprias mãos ou com o auxílio da vela. Veja que o nível da água abaixa um pouco e que forma-se pequenas bolhas na água.

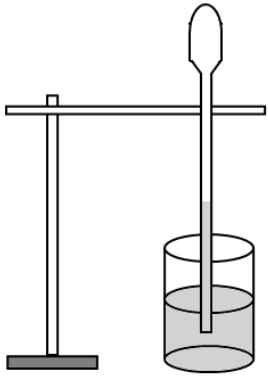

Figura 1.1: Termômetro de Galileu.

A seguir resfrie o bulbo com a pedra de gelo, ou espere um certo tempo para que a temperatura abaixe. Você observará a água subir pelo tubo.

Análise e Explicação

Ao aquecer o bulbo da lâmpada, o ar contido no seu interior se expande e sai pela extremidade inferior do tubo. Quando o bulbo se resfria, o ar no seu interior também se resfria e se contrai, fazendo com que a água seja empurrada pela pressão atmosférica para dentro do tubo. A coluna de água se estabiliza quando a temperatura ambiente e a temperatura do ar no interior do tubo forem iguais.

A partir de então, quando a temperatura aumenta, o volume de ar contido na lâmpada e no tubo também aumenta, fazendo a coluna de água baixar. Quando a temperatura diminui, o gás se contrai e a coluna e água sobe.

No equilíbrio da coluna de água, tem-se que:

$$p_{at} = p_{água} + p_{ar}$$

onde p_{at} é a pressão atmosférica, $p_{água}$ é a pressão da água e p_{ar} a pressão do ar interno. Sendo que a p_{at} é constante, o aumento da temperatura provoca o aumento de p_{ar} no interior do termômetro. Dessa forma, a $p_{água}$ diminui, o

que leva a diminuição da altura (h) da coluna de água. Sendo que a pressão exercida pela coluna de água ($p_{água}$) é dada por:

$$p_{água} = \rho g h$$

onde ρ é a densidade da água e g a aceleração da gravidade, percebe-se que existe uma relação linear direta entre a altura da coluna de água e a temperatura do bulbo.

É importante lembrar que o tubo não deve ser muito curto, pois grandes variações de temperatura podem fazer a água entrar no bulbo da lâmpada ou ser toda ela expulsa do tubo.

1.2 Expansão de um Gás

Objetivo

Verificar a expansão de um gás com o aumento da sua temperatura.

Materiais Utilizados

1 suporte universal, 1 balão de borracha, 1 tubo de ensaio, 1 pedaço de barbante, 1 lamparina.

Montagem e Procedimento

Monte o experimento de acordo com a Fig.(1.2). Coloque água no tubo de ensaio (cerca da metade da sua capacidade) e prenda um balão vazio com barbante na sua boca. Acenda a lamparina, de modo que ela aqueça o tubo de ensaio. Com o passar do tempo você notará que o balão vai enchendo.

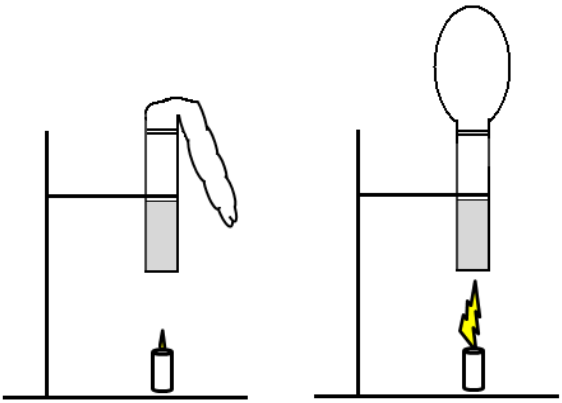

Figura 1.2: Aquecimento do tubo de ensaio contendo água, acoplado no balão.

Num segundo momento aqueça o tubo de ensaio e depois coloque nele o balão. Observe que o balão vai sendo sugado para dentro do tubo.

Análise e Explicação

Quando um sistema aumenta a sua temperatura, a tendência desse sistema é sofrer uma expansão. No caso deste experimento, quando o tubo aquece, o ar que está no seu interior se expande, enchendo o balão. Além disso, o aquecimento da água gera vapor, que contribui para o efeito.

Ao ser colocado o balão no tubo aquecido, o ar no interior do tubo está rarefeito. À medida que vai abaixando a temperatura do ar, a sua pressão diminui, o que faz com que o seu volume diminua e sugue o balão para o seu interior.

1.3 Deformação de uma Garrafa PET 1

Objetivo

Verificar a deformação de uma garrafa PET pela pressão atmosférica.

Materiais Utilizados

1 garrafa PET ($1L$ ou $2L$), 1 ebulidor (ou fogareiro), copo com água (se utilizar o fogareiro deve-se usar um bequer e uma tela de amianto).

Montagem e Procedimento

Aqueça uns $100ml$ de água até ferver. Despeje essa água dentro da garrafa e dê uma leve agitada. Rapidamente jogue a água fora e feche a garrafa com a tampa. Disponha-a na horizontal e jogue água fria sobre ela. Perceba que a garrafa se deformará, sofrendo um esmagamento.

Uma outra forma de fazer esse experimento é despejando um pouco de álcool no interior da garrafa e agitando-a bem. Em seguida jogue 1 palito de fósforo dentro dela, deixando- queimar até se apagar. Tampe a garrafa e observe que ela se amassa sozinha.

Análise e Explicação

A água quente no interior da garrafa faz com que o ar fique aquecido e rarefeito (isso também pode ser feito com a queima do álcool). Após a garrafa ser tampada, a temperatura do ar no seu interior tende a abaixar, o que leva à redução da sua pressão. Dessa forma, surge uma diferença de pressão entre o meio interno e o externo. Sendo a pressão externa maior que a interna, surge uma força que tende a esmagar a garrafa. O ato de jogar água fria sobre a garrafa apenas intensifica e acelera o processo.

1.4 Deformação de uma Lata

Objetivo

Verificar a deformação de uma lata de refrigerante através da pressão atmosférica.

Materiais Utilizados

1 pegador, 1 lata de refrigerante vazia, 1 fogareiro, 1 recipiente largo com água.

Montagem e Procedimento

Coloque um pouco de água na lata e leve-a ao fogareiro, com a boca para cima, deixando a água vaporizar totalmente. Em seguida pegue a lata e emboque-a no recipiente com água, afundando-a um pouco. Observe a rápida deformação que a lata sofre (Fig.1.3).

Figura 1.3: Lata amassada.

Análise e Explicação

O ar no interior da lata se rarefaz por causa do aquecimento direto da vaporização da água. Quando a lata é embocada na água, o ar nela contido se resfria rapidamente. Com isso a pressão interna da lata fica bem menor que a pressão externa, o que provoca o esmagamento da mesma.

Utilizar água dentro da lata é muito importante porque, quando transformada em vapor, seu volume aumenta bastante, o que faz com que o ar seja expulso do interior, deixando-o bem rarefeito.

É importante que a lata seja tirada do fogo e embocada rapidamente na água. Se tirarmos a lata do fogo e deixarmos que ela esfrie naturalmente aberta, o ar retorna ao seu interior e nada acontece. Fazendo o aquecimento da lata, sem a utilização da água, o efeito também ocorre, mas é bem menos acentuado.

1.5 A Chama que Suga a Água

Objetivo

Mostrar a atuação da pressão atmosférica na sucção de água num copo.

Materiais Utilizados

1 vela (com cerca de $5cm$ a $10cm$ de altura), 1 copo de vidro transparente (de altura maior que a altura da vela), 1 prato (ou 1 recipiente semelhante), água, fósforo, 1 palito, algodão, álcool.

Montagem e Procedimento

Fixe a vela no centro do prato. Despeje água no prato e acenda a vela (Fig.1.4-a). Deixe-a queimar por um tempo (no mínimo uns $10s$) e em seguida envolva-a com o copo. Observe que, depois que a vela apaga, um pouco de água é sugada para dentro do copo (Fig.1.4-b).

a) b)

Figura 1.4: a- Vela fixada no prato; b- Água sugada para dentro do copo.

Repita o experimento substituindo a vela por uma bola de algodão embebida em álcool, suspensa num palito. Perceba que ela vai produzir uma chama bem maior e depois de apagada vai sugar uma maior quantidade de água.

Análise e Explicação

A combustão da vela é uma reação química entre os hidrocarbonetos da vela e o oxigênio do ar, e forma gás carbônico e vapor de água. O ar aquecido ao redor da chama da vela ou do algodão se expande, tornando-se rarefeito. Esse ar rarefeito é aprisionado quando se tampa a chama com o copo. A vela queima até que tem oxigênio no interior do copo, e este acaba aprisionando os gases em alta temperatura e o vapor de água.

A subida da água ocorre devido ao fato do gás carbônico ser solúvel em água e por causa do abaixamento da temperatura dos gases, fazendo com que uma parte do vapor de água se condense. Isso leva à uma diminuição da pressão dentro do copo. A pressão interna fica menor que a pressão externa (atmosférica) o que faz com que a água seja empurrada para dentro do copo até que a pressão interna mais a pressão da coluna de água dentro do copo equilibre a pressão atmosférica.

A utilização do algodão com álcool produziu uma chama maior, o que teve como consequência a sucção de uma maior quantidade de água. Isso ocorre porque, comparado com a vela, houve um maior fornecimento de calor, o que resultou numa maior expansão do ar, tornando-o mais rarefeito.

1.6 Chafariz Térmico

Objetivo

Verificar o aumento da pressão e a expansão dos gases com o aumento da temperatura.

Materiais Utilizados

1 tubo de ensaio (grande), 1 tubo de vidro (fino), 1 rolha de borracha furada, 1 ebulidor elétrico, 1 recipiente com água.

Montagem e Procedimento

Coloque um pouco de água no tubo de ensaio. Passe o tubo por dentro da rolha e encaixe-a no tubo de ensaio. Utilize cerca de 10% do volume de água.

Aqueça o recipiente de água com o ebulidor e, quando este estiver próximo da temperatura de ebulição, coloque o tubo dentro dele. Observe, então, a água sair em jatos pelo tubo fino, formando uma espécie de chafariz. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(1.5).

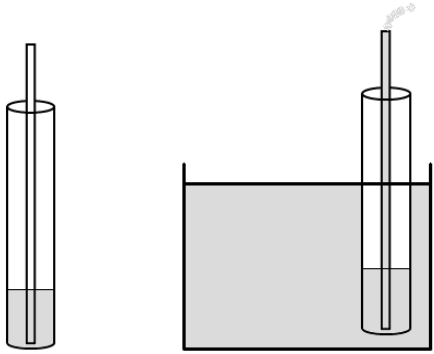

Figura 1.5: Chafariz térmico.

Análise e Explicação

Ao aquecer a água aquece-se também o ar dentro do tubo, fazendo com que sua pressão aumente. Ao atingir uma determinada temperatura, sua pressão torna-se tal que a água é empurrada para fora.

1.7 Formação de uma Nuvem

Objetivo

Produzir uma pequena nuvem dentro de um recipiente de vidro.

Materiais Utilizados

1 erlemeyer (ou outro recipiente transparente de vidro de boca pequena, como uma garrafa transparente, por exemplo), 1 rolha de borracha, 1 tubo de borracha ou plástico, 1 seringa grande, fósforo.

Montagem e Procedimento

Coloque um pouco de água dentro do recipiente. Passe o tubo pelo meio da rolha e prenda o conjunto na boca do recipiente, de modo a vedar bem a entrada.

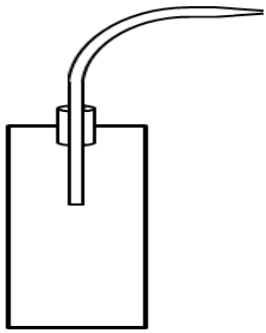

Figura 1.6: Nuvem na garrafa.

Com o auxílio de uma seringa grande, ou com a própria boca sugue um pouco do ar do recipiente e feche o tubo com os dedos. Acenda um palito de fósforo e apague-o com um sopro. Quando o palito estiver produzindo fumaça encoste-o na ponta do tubo e solte os dedos. A fumaça vai ser sugada para dentro do tubo. Fechando novamente o tubo, observe a formação de uma pequena nuvem no seu interior.

Análise e Explicação

Inicialmente o recipiente contém vapor de água no seu interior. A sugada do ar feita pelo canudinho provocou a queda da pressão interna. A diminuição da pressão causou uma expansão do ar, diminuindo a sua temperatura, o que induziu a formação de pequenas gotas de água líquida.

A presença de partículas de fumaça faz com que as gotas de água cresçam e se agrupem, formando uma gota maior. Se não existir essas partículas, as gotas evaporam rapidamente, voltando ao estado gasoso.

Este experimento tenta montrar o fenômeno de formação de gotas de chuva numa nuvem. Tais gotas somente se formam se existirem núcleos de condensação em suspensão na atmosfera.

1.8 Volume de Ar em função da Temperatura

Objetivo

Verificar a variação do volume com a temperatura.

Materiais Utilizados

1 garrafa PET, 1 canudinho de refresco, 1 recipiente com água, álcool, resina epóxi.

Montagem e Procedimento

Faça um furo na tampa da garrafa, passe por ela o canudinho e vede bem com a resina epóxi. Coloque o canudinho no recipiente com água. Passe álcool na superfície da garrafa e ventile-a para favorecer a evaporação. Observe que a água sobe pelo canudinho, podendo chegar à garrafa.

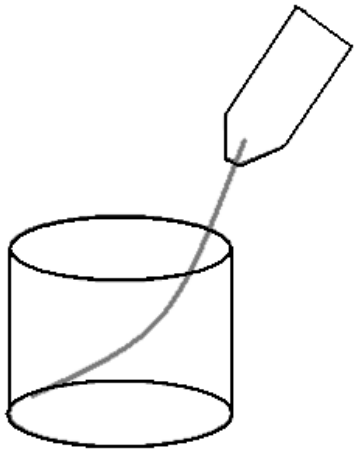

Figura 1.7: Água subindo pelo canudinho.

Análise e Explicação

Ao evaporar o álcool retira calor da garrafa, o que resfria a sua parede e a massa de ar nela contida. O volume do ar aprisionado é o volume do interior do frasco mais o volume do canudinho não ocupado pela água. Por causa do abaixamento da temperatura a massa de ar se contrai (diminui de volume) e a pressão interna diminui, tornando-se menor que a do ar externo. Essa diferença de pressão faz com que a água suba pelo canudinho e seja empurrada para o interior da garrafa.

No aquecimento do frasco ocorre o processo inverso. Para isso coloque as mãos quentes ao redor da garrafa e observe que a água é expulsa do seu interior.

1.9 Densidades de Gases

Objetivo

Verificar que diferentes gases têm diferentes densidades.

Materiais Utilizados

1 lamparina (com suporte e cabo alongado), bicarbonato de sódio, ácido acético (vinagre), 2 garrafas PET (cortadas a parte superior).

Montagem e Procedimento

Acenda a lamparina e coloque-a no interior da garrafa (1), a qual contém apenas o ar atmosférico (Fig.1.8). Perceba que a lâmpada continua acesa.

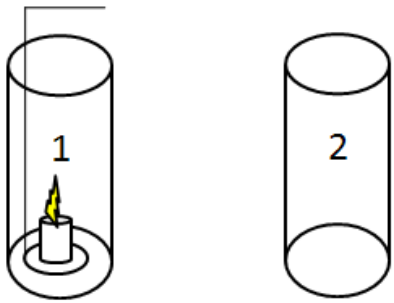

Figura 1.8: Garrafas.

Na garrafa 2 misture vinagre com um pouco de bicarbonato de sódio. Em seguida, leve a lamparina acesa para dentro dessa garrafa e perceba que agora ela apaga (Fig.1.9-a).

Agora vire as 2 garrafas uma para a outra, de modo a transferir o gás que supostamente existe na garrafa 2 para a garrafa 1 (Fig.1.9-b). Coloque novamente a lamparina acesa no interior da garrafa 1 e observe que agora ela se apaga (Fig.1.9-c).

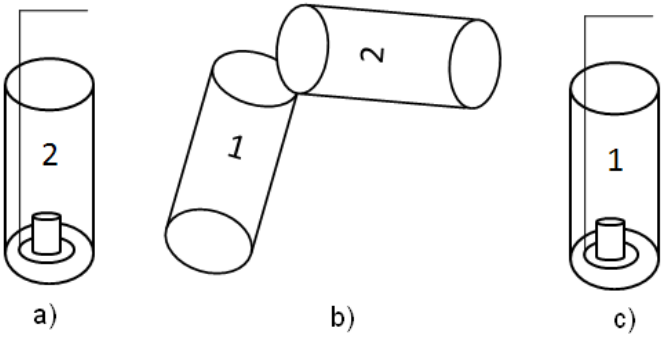

Figura 1.9: a- A lamparina se apaga; b- Transferência de gás; c- A lamparina de apaga.

Análise e Explicação

A reação entre bicarbonato de sódio e o vinagre (solução de ácido acético) produz gás carbônico (CO_2), de acordo com a reação:

$$CH_3COOH + NaHCO_3 \longrightarrow H_2O + CO_2 \uparrow + CH_3COONa$$

Sendo mais denso que o ar normal, o CO_2 é transferido da garrafa 2 para a garrafa 1. Ao ser introduzida novamente na garrafa 1 a lamparina se apaga, pois o CO_2 não consegue manter a combustão.

1.10 Ebulidor de Franklin

Objetivo

Verificar a expansão de um gás com o aumento da temperatura.

Materiais Utilizados

2 balões de vidros ligados por um tubo (também de vidro) e preenchido por um líquido (água).

Montagem e Procedimento

Um esquema do ebulidor de Franklin está na Fig.(1.10). Coloque a mão sobre um dos balões e, deixando o outro livre, perceba que ocorre o deslocamento do líquido do balão envolto com a mão para o outro.

Figura 1.10: Ebulidor de Franklin.

Análise e Explicação

O aumento da temperatura do balão causado pelo envolvimento deste com a mão provoca o aumento da pressão do gás, que se expande e empurra o líquido para o outro balão.

1.11 Pressão Interna de uma Lâmpada Fluorescente

Objetivo

Determinar a pressão interna de uma lâmpada fluorescente.

Materiais Utilizados

1 lâmpada fluorescente queimada, 1 balde com água, 1 prego (com $2cm$ ou $3cm$ de comprimento), 1 disco metálico (ou de madeira, tal que se ajuste ao fundo do balde), 1 trena, 1 alicate de bico.

Montagem e Procedimento

Introduza o prego no centro do disco e depois coloque esse conjunto no fundo do balde, enchendo-o de água. Com o auxílio do alicate de bico, retire o terminal metálico de uma das extremidades da lâmpada[1]. Em seguida direcione verticalmente essa extremidade na ponta do prego no fundo do balde, pressionando-a levemente, de modo a perfurar a lâmpada. Uma outra opção seria quebrar o pino de conexão elétrica com a alicate em baixo da água.

Perceba que a água do balde é sugada para o interior da lâmpada, atingindo uma determinada altura. Com o auxílio da trena meça os valores das alturas h_1 e h_2 e determine o valor da pressão interna do gás da lâmpada[2] Um esquema da montagem e realização do experimento está representado na Fig.(1.11).

Análise e Explicação

Uma lâmpada fluorescente funciona com gás a baixa pressão no seu interior. Quando uma de suas extremidades é perfurada, a água entra pelo tubo

[1] Aqui deve-se escolher preferencialmente a extremidade mais clara da lâmpada queimada, para depois facilitar a leitura do nível da água.

[2] Nesse experimento é necessário tomar um pouco de cuidado quanto à possibilidade da lâmpada explodir, no momento em que tira-se o terminar elétrico com o alicate ou quando fura-se ela no prego no fundo do balde. Apesar desse experimento ter sido feito diversas vezes pelo autor deste livro sem nada de anormal ter ocorrido, recomenda-se usar, no mínimo um óculos de proteção e uma luva de couro.

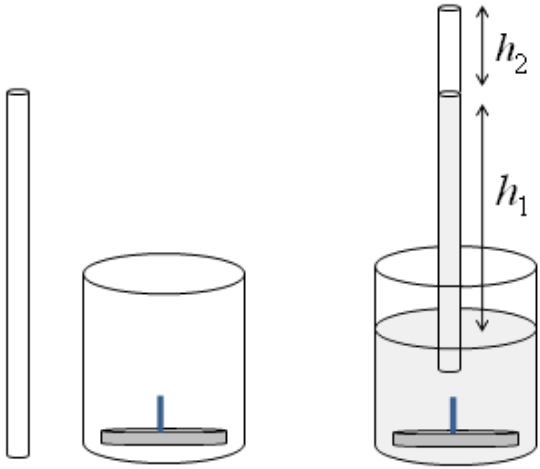

Figura 1.11: Medindo a pressão interna de uma lâmpada.

e comprime o gás, até que sua pressão, resultante da compressão exercida, somada à pressão da coluna de água, se iguale à pressão atmosférica externa.

Considerando que o gás no interior do tubo sofre uma transformação isotérmica, tem-se que:

$$p_0 V_0 = pV \tag{1.1}$$

onde p_0 e V_0 são a pressão e o volume iniciais, e p e V a pressão e o volume finais. A pressão final é determinada pelo principio de Stevin da hidrostática:

$$p = p_{atm} - \rho g h_1 \tag{1.2}$$

onde p_{atm} é a pressão atmosférica local, ρ a densidade da água, g a aceleração da gravidade e h_1 a altura alcançada pelo coluna de água. Substituindo (1.2) em (1.1), tem-se que a pressão interna inicial da lâmpada é:

$$p_0 = (p_{atm} - \rho g h_1)\frac{V}{V_0} \tag{1.3}$$

Apesar das extremidades da lâmpada terem um formato irregular, podemos aproximá-las como tendo formato cilíndrico. Dessa forma, o volume é

calculado por:

$$V = Ah \tag{1.4}$$

onde A é a área do círculo.

Levando (1.4) em (1.3), obtem-se:

$$p_0 = (p_{atm} - \rho g h_1)\frac{h_2}{h_1}$$

Teoricamente o valor da pressão interna das lâmpadas fluorescentes ficam em torno de $3.10^3 atm$. Os valores obtidos experimentalmente podem diferir bastante de tal valor, mas possuem sempre a mesma ordem de grandeza. Isso deve-se ao método rústico utilizado (porém, didático), aos erros nas medidas realizadas e a consideração que os gases envolvidos são reais.

1.12 Balões Acoplados

Objetivo

Verificar o comportamento do volume de 2 balões interligados.

Materiais Utilizados

2 balões (iguais), 1 mangueirinha flexível (para conectar os balões), 1 grampo, fita adesiva.

Montagem e Procedimento

Conecte os 2 balões nas extremidades da mangueirinha, prendendo-os com fita adesiva, e no meio deste coloque um grampo, de modo a impedir a passagem de ar de um para o outro. Inicialmente um dos balões deve estar bem cheio (balão 2) e o outro apenas um pouco cheio (balão 1).

Em seguida retire o grampo da mangueirinha e observe o que acontece. O balão 1 murcha um pouco, permitindo que o balão 2 encha um pouco mais (Fig.1.12).

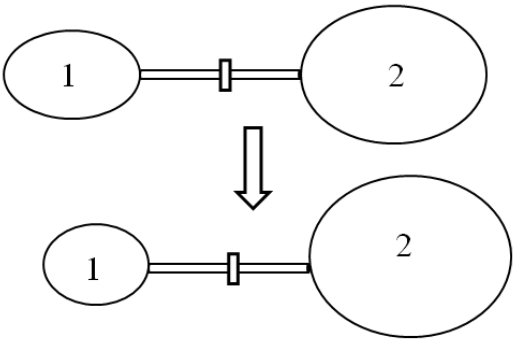

Figura 1.12: Balões acoplados.

Repita o mesmo procedimento, mas agora com o balão 1 um pouco mais cheio. Perceba que o balão 1 enche um pouco e, consequentemente, o balão

2 murcha um pouco (Fig.1.13). O que é observado nos dois casos é que os balões dificilmente ficam com o mesmo volume.

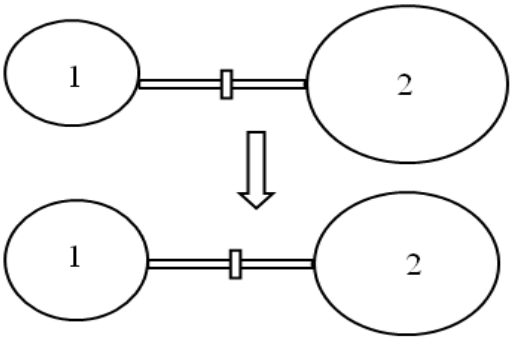

Figura 1.13: Balões acoplados.

Análise e Explicação

Estando os 2 balões interconectados pela mangueirinha, após ser retirado o grampo ocorre o fluxo de ar do balão que está com maior pressão para o que está com menor pressão, até que as pressões se equilibrem. Portanto, na Fig.(1.12), inicialmente tínhamos que a pressão no balão 1 era maior que no balão 2 ($p_1 > p_2$) e na Fig.(1.13) que a pressão no balão 1 era menor que no balão 2 ($p_1 < p_2$).

Dentro de um balão de borracha inflado, a pressão é um pouco maior que a pressão externa, que é a pressão atmosférica. Essa diferença de pressão deve-se à membrana de borracha que constitui o balão, e é diretamente proporcional à tensão superficial da membrana e inversamente proporcional ao seu raio de curvatura médio. Sendo constante a tensão superficial, a diferença de pressão entre o meio interno e externo diminui conforme aumenta o raio de curvatura da membrana.

O balão menor tem um raio de curvatura menor e as forças elásticas tangenciais que atuam numa superfície pequena tem uma componente centrípeta resultante que é maior do que no balão grande. Por haver uma força maior para dentro, há uma pressão interna menor no balão pequeno. Isso explica

também o fato de ser mais difícil começar a encher um balão do que continuar a enchê-lo quando ele já se expandiu. Com o aumento do volume, as componentes centrípetas das forças elásticas tangentes à superfície tornam-se progressivamente menores.

Nos balões as tensões superficiais nas suas membranas de borracha variam. A variação de pressão (p) em função do volume (V) é obtida experimentalmente, e tem uma curva como a representada na Fig.(1.14).

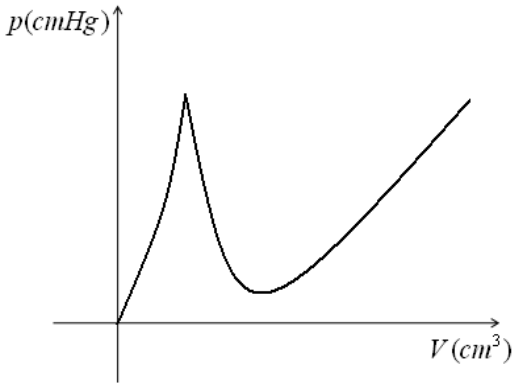

Figura 1.14: Pressão do ar em função do volume num balão.

Outro detalhe que se constata é que os balões acoplados não evoluem para um mesmo volume, sempre ficando um mais cheio que o outro. Isso acontece porque, além das deformações elásticas, ocorrem deformações plásticas no balão, ou seja, mudanças na sua estrutura de borracha. Isso é facilmente constatado ao encher um balão novo onde, após esvaziá-lo ele não retorna ao formato original.

1.13 Copo e Balão

Objetivo

Estudar a relação entre pressão e volume.

Materiais Utilizados

1 balão de borracha, 1 copinho plástico.

Montagem e Procedimento

Encha um pouco o balão. Encoste a boca do copinho no balão, pressionando-o sobre ele (Fig.1.15-a). Segure o copinho e encha mais o balão. Agora solte o copinho e perceba que ele está grudado no balão e não se solta facilmente (Fig.1.15-b).

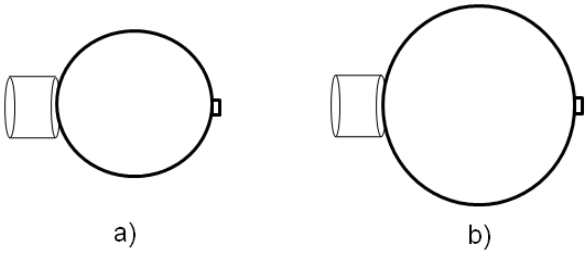

Figura 1.15: Copo e balão: a- Copo solto; b- Copo preso.

Análise e Explicação

O enchimento do balão provoca a diminuição da pressão no interior do copo, o que faz com que este fique preso ao balão.

1.14 Enchimento de um Balão

Objetivo

Encher um balão através da diminuição da pressão externa.

Materiais Utilizados

1 balão de borracha, 1 garrafa PET ($2L$), 1 compasso (ou qualquer outro objeto que tenha ponta), fita adesiva.

Montagem e Procedimento

Faça um furo na lateral inferior da garrafa com a ponta do compasso. Retire a tampa da garrafa e introduza no seu interior o balão vazio, virando a boca do balão ao redor da boca da garrafa, de modo a deixá-lo preso, como representado na Fig.(1.16).

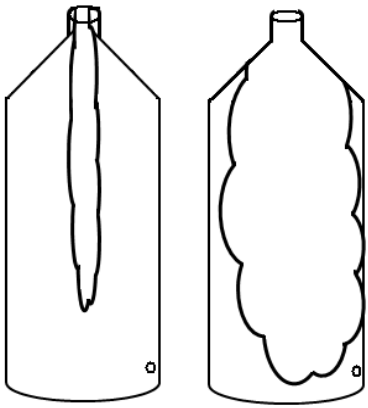

Figura 1.16: Balão na garrafa.

Em seguida coloque a boca no orifício lateral da garrafa e aspire o ar do seu interior. Tampe o orifício com o dedo e repita o procedimento várias vezes. Você notará que o balão irá se encher. Poderá fazer com que o balão

ocupe quase todo o volume interno da garrafa. Após isso poderá tampar o orifício com um pedaço de fita adesiva (Fig.1.16).

Perceba que você conseguiu encher o balão e agora o mantém cheio, mesmo estando a sua boca aberta.

Análise e Explicação

A sucção do ar no interior da garrafa faz com que diminua a pressão nessa região. Isso faz com que o ar externo entre pela boca da garrafa e encha o balão. Mostrando o balão já cheio e escondendo o orifício na garrafa pode-se instigar as pessoas em descobrir como isso é possível.

1.15 Funcionamento dos Pulmões

Objetivo

Construir e simular o funcionamento de um pulmão.

Materiais Utilizados

1 garrafa PET pequena, 3 balões de borracha, 2 tubos flexíveis de borracha (de diâmetro diferentes), 1 tesoura, silicone.

Montagem e Procedimento

Encaixe dois pedaços do tubo fino numa das extremidades do tubo de diâmetro maior. Fixe os dois balões pequenos nas extremidades dos dois tubos finos. Se necessário use elásticos para prendê-los. Com a tesoura retire o fundo da garrafa e passe o tubo maior pela tampa da mesma, de modo que os balões fiquem dentro dela. Use silicone para vedar a passagem de ar entre o tubo grande e a tampa da garrafa e na conexão entre os tubos.

Corte a parte inferior do terceiro balão, dê um nó no seu bico e coloque-o no fundo da garrafa, com o bico para fora. Esta membrana de borracha vai se comportará como um diafragma. Mova o diafragma para cima e para baixo e observe o que ocorre com os balões. Estes se comportam como nossos pulmões. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(1.17).

Análise e Explicação

Este experimento simula o funcionamento dos pulmões. O diafragma é um músculo que, junto com outros, coordena o processo de inspiração e expiração do sistema respiratório humano. Quando o diafragma relaxa, reduz a pressão exercida e o ar entra nos pulmões. Durante a contração do músculo, aumenta a pressão sobre os pulmões, e o ar é expulso parcialmente do seu interior.

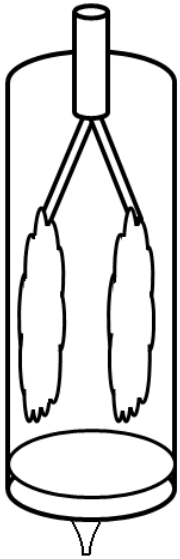

Figura 1.17: Esquema de um pulmão.

1.16 Lei de Charles e Gay-Lussac

Objetivo

Estudar a relação entre volume e temperatura para uma determinada massa gasosa, sob pressão constante.

Materiais Utilizados

1 béquer, 1 termômetro, 1 lamparina, 1 tripé com tela de amianto, 1 seringa com tampa ($10ml$), 1 suporte, 1 garra, água.

Montagem e Procedimento

Deixe a seringa com metade do volume de ar e feche o seu bico com a tampa que a acompanha (ou improvise algo com essa finalidade). Coloque água no béquer e leve o conjunto para o aquecimento sobre a tela de amianto e

o tripé sobre a lamparina. Usando a garra prenda o termômetro ao suporte, de modo que o bulbo do termômetro fique imerso na água sem encostar no fundo do béquer. Uma ilustração da montagem do experimento está na Fig.(1.18).

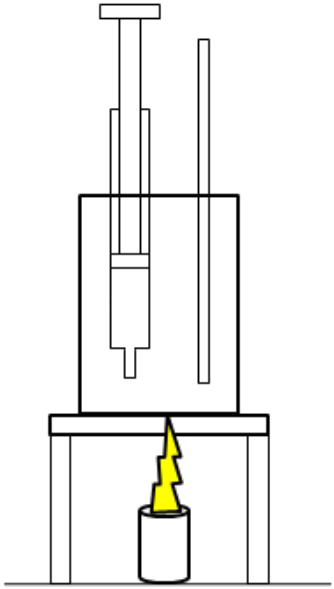

Figura 1.18: Seringa e termômetro no béquer.

Coloque a seringa no béquer e inicie o aquecimento. Quando o êmbolo da seringa iniciar a se deslocar, comece a fazer medidas de volume e da temperatura correspondente. Após cada medida sempre aperte um pouco e solte o êmbolo, de modo a ajustar para que ele fique livre para se deslocar.

Obtenha diversos pontos de volume[3] e temperatura da água (que é aproximadamente a mesma temperatura do gás no interior da seringa) e preencha uma tabela como a Tab.(1.1).

Com os dados da Tab.(1.1) construa um gráfico de $V \times T$, o qual terá uma forma semelhante ao da Fig.(1.19).

[3] A variação de volume nesse experimento é pequena, sendo no máximo $5ml$.

Tabela 1.1: Dados de V e T.

$V(ml)$					
$T(K)$					

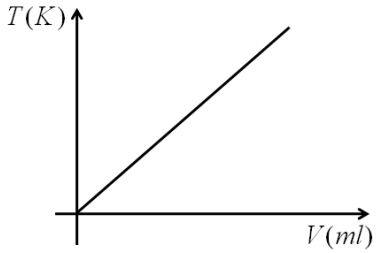

Figura 1.19: Gráfico de $V \times T$.

Análise e Explicação

Nesta situação em que o êmbolo da seringa está livre para mover-se a pressão do gás mantém-se aproximadamente constante[4], de modo que tem-se uma transformação isobárica. Ao estudar esse caso os cientistas César Charles e Joseph Gay-Lussac constataram que o volume (V) ocupado pelo gás e sua temperatura (T) (na escala absoluta) são diretamente proporcionais, de modo que a razão entre eles é sempre igual à uma constante k:

$$\frac{V}{T} = k$$

Entre dois pontos quaisquer (1 e 2) numa transformação isobárica, sempre tem-se que:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Experimentalmente os pontos de $V \times T$ distribuem-se ao redor de uma reta, como a do gráfico da Fig.(1.19).

[4] A força de atrito entre o êmbolo e o cilindro é praticamente constante, a pressão atmosférica também é constante e o peso do êmbolo é despresível.

1.17 Lei de Boyle-Mariotte

Objetivo

Estudar a relação entre pressão e volume para uma determinada massa gasosa sob uma transformação isotérmica.

Materiais Utilizados

1 seringa com tampa ($10ml$), 1 suporte, 1 garra, várias massas conhecidas (isso pode ser também feito com uma proveta e uma garrafa PET, na qual vai colocando uma quantidade de água conhecida dentro dela).

Montagem e Procedimento

Deixe a seringa cheia de ar e tampe-a. Em seguida coloque-a na vertical, com a tampa apoiada na mesa e presa no suporte. Apóie a garrafa PET sobre o êmbolo da seringa e vá adicionando água no seu interior. Uma ilustração da montagem do experimento está na Fig.(1.20).

Vá anotando a massa que está apoiada sobre o êmbolo (e dela obtenha a força peso) e o correspondente volume de gás na seringa, preenchendo uma tabela como a Tab.(1.2). Como a área de atuação da força é constante, pode-se dizer que a pressão sofrida pelo gás é diretamente proporcional à força peso nela aplicada.

Tabela 1.2: Dados de P e V.

$P(N)$				
$V(ml)$				

Análise e Explicação

Robert Boyle e Edine Mariotte estudaram de maneira independente transformações gasosas nas quais a temperatura (T) era mantida constante. Verificaram que a pressão (p) do gás e o seu volume (V) variavam de maneira

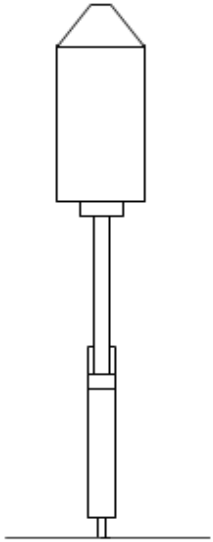

Figura 1.20: Gás numa seringa sofrendo pressão.

inversamente proporcional. Se aumentava-se a pressão o volume diminuia e se reduzia-se a pressão o volume aumentava.

Matematicamente sempre tem-se que:

$$pV = k$$

onde k é uma constante. Mudando isotermicamente de um estado 1 para um estado 2 tem-se que:

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

Construindo um gráfico de $p \times V$ para uma transformação isotérmica obtem-se uma curva chamada isoterma, que é uma hipérbole, como representada na Fig.(1.21).

Microscopicamente a temperatura está relacionada à velocidade média das partículas e a pressão ao número de colisões delas com as paredes do recipiente. Dessa forma, uma diminuição do volume aumenta o número de colisões das partículas com as paredes do recipiente. De maneira inversa, o

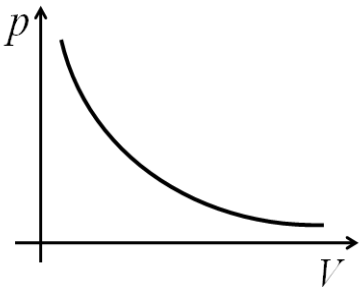

Figura 1.21: Isoterma.

aumento de volume aumenta o espaço disponível, o que diminui o número de colisões, levando à diminuição da pressão.

1.18 Transformação Isotérmica

Objetivos

Verificar uma transformação isotérmica.

Materiais Utilizados

1 tubo em forma de U (pode ser feito juntando 2 tubos em forma de L ou uma manga flexível transparente), 1 balão de borracha, água, fita adesiva.

Montagem e Procedimento

Prenda com um pedaço de fita adesiva o tubo em U, de modo a deixá-lo na vertical e despeje um pouco de água no seu interior. Coloque o balão em uma das pontas e pressione-o, deixando-o sem ar. Feche a ponta do tubo com o dedo e despeje mais água no outro lado do U, até a borda.

A seguir, retire o dedo e observe que o ar entra no balão, e este acaba enchendo um pouco. Encha a extremidade do tubo até a borda. As etapas do experimento estão representadas na Fig.(1.22).

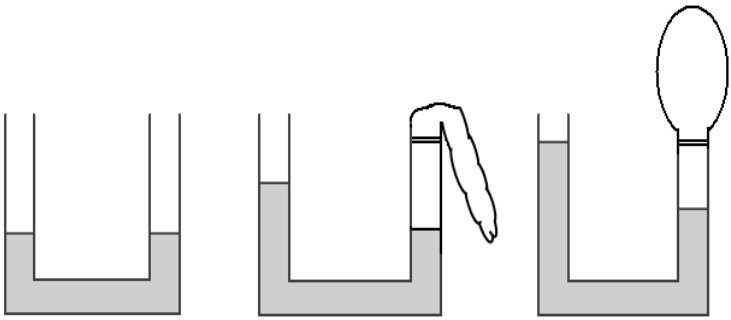

Figura 1.22: Tubo com água e balão.

Antes de colocar o balão no tubo é bom enchê-lo e esvaziá-lo algumas vezes para deixá-lo mais elástico.

Análise e Explicação

O desnível da coluna de água nos 2 lados do tubo em U indica que a pressão no lado do balão é maior que a pressão atmosférica.

Considerando que temperatura do gás não muda, de acordo com a lei de Boyle-Mariotte tem-se que:

$$pV = k$$

onde p é a pressão do gás, V é o seu volume e k é uma constante.

1.19 Lei de Charles

Objetivo

Mostrar o comportamento da pressão e da temperatura de um gás numa transformação gasosa isovolumétrica.

Materiais Utilizados

1 balança de precisão, diversas massas, 1 erlenmeyer com rolha de borracha, 1 seringa com agulha, 1 fogareiro, 1 tripé, 1 tela de amianto.

Montagem e Procedimento

Coloque água no erlenmeyer, deixando uma parte com ar (uns $100ml$ - $150ml$). Na rolha de borracha faça 2 furos. Num deles introduza a agulha da seringa (com o êmbolo no fundo) e no outro o termômetro. Tampe o erlenmeyer com a rolha e coloque-o sobre a tela de amianto no tripé para o aquecimento. O bulbo do termômetro deve ficar encostado na água e o êmbolo da seringa deve estar bem limpo e seco, de modo que deslize sem atrito. Prenda a seringa num suporte, fazendo com que ela fique bem firme.

Durante o aquecimento[5], quando o êmbolo começar a se movimentar, leia o valor da temperatura e coloque uma massa sobre ele. Em seguida, quando o êmbolo começar a se movimentar novamente leia a temperatura e coloque mais uma massa. Continue com o processo e retire outros dados. É necessário inicialmente ter medido a massa do êmbolo da seringa. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(1.23).

Com os dados obtidos construa uma tabela $p \times T$ (pressão x temperatura) (T em K). Neste caso, ao invés de usarmos valores de pressão usaremos valores de massa, já que $p = F/A$ e a área é a mesma, e $F = P = mg$, sendo que g é constante. Ou seja, a pressão é diretamente proporcional à massa que comprime o gás no erlenmeyer. É importante lembrar que os valores de massa são acumulativos. Para o primeiro ponto de temperatura registrado deve-se

[5] O aquecimento não deve ser muito rápido, pois isso dificulta a obtenção de dados.

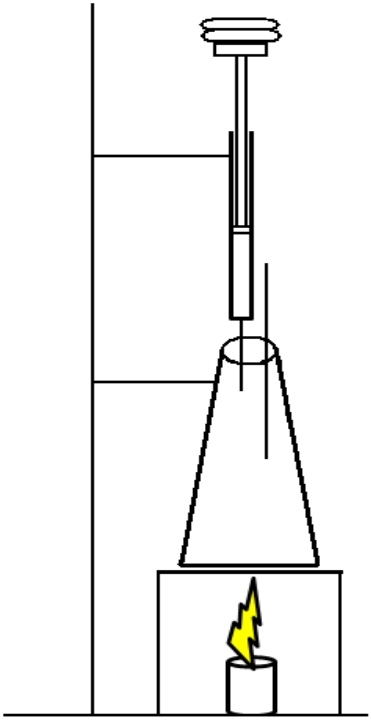

Figura 1.23: Seringa e termômetro conectados no erlenmeyer com água.

utilizar a massa do êmbolo; para o segundo ponto de T, a massa do êmbolo + a massa colocada, e assim sucessivamente.

Análise e Explicação

A transformação gasosa que ocorre com volume constante é denominada isométrica, isocórica ou isovolumétrica. Jacques Charles observou que nesse tipo de transformação as variações da pressão (p) e da temperatura (T, em K) são diretamente proporcionais, de modo que:

$$\frac{p}{T} = k$$

onde k é uma constante.

Numa transformação entre dois estados tem-se que:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

O gráfico de $p \times T$ tem a forma da Fig.(1.24).

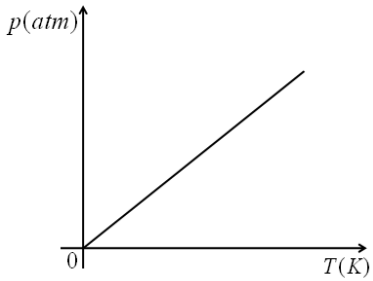

Figura 1.24: Transformação isovolumétrica.

1.20 Transformação Isovolumétrica

Objetivo

Estudar uma transformação isovolumétrica.

Materiais Utilizados

1 garrafa PET ($2L$), 1 termômetro, 1 bomba de encher pneu.

Montagem e Procedimento

Acople a manga da bomba de encher pneu na tampa da garrafa PET, de modo que ela fique bem firme. Coloque o termômetro dentro da garrafa, feche a sua tampa e bombeie ar dentro da garrafa. Faça bastante força, de modo que a pressão no interior da garrafa eleve-se consideravelmente. Acompanhe a elevação da temperatura do ar no interior da garrafa marcada pelo termômetro.

Análise e Explicação

Neste experimento ocorre uma transformação gasosa isovolumétrica. O aumento de pressão provocado pelo bombeamento de ar para o interior da garrafa faz aumentar a sua temperatura. Maiores explicações foram dadas no Exp.(1.19).

1.21 Fumaça que Desce

Objetivo

Observar e explicar o fenômeno da fumaça que desce.

Materiais Utilizados

1 garrafa PET furada na lateral, fósforo, 1 folha de papel.

Montagem e Procedimento

Enrole a folha de papel, de modo a formar um tubo fino, e introduza-o no orifício lateral da garrafa. Coloque fogo no papel e observe que a fumaça sobe na parte externa e desce na parte interna, contrariando o senso comum, que considera que a fumaça é mais leve que o ar e sempre deveria subir. Isso está representado na Fig.(1.25).

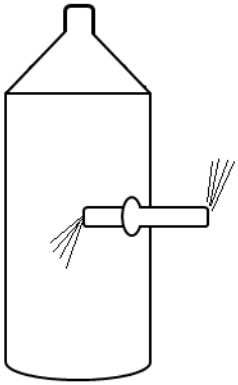

Figura 1.25: Fumaça descendo.

Análise e Explicação

No lado externo da garrafa a fumaça está misturada com o ar quente produzido pelo fogo que queima o papel. Devido a alta temperatura a fumaça

sobe com a corrente de convecção do ar quente que a envolve, causando o movimento ascendente da fumaça.

Uma parte da fumaça da queima também se desloca por dentro do tubo de papel e acaba saindo dentro da garrafa. Ali o ar está parado e, por ser a fumaça mais densa que o ar e estando livre das correntes de convecção, ela desce.

1.22 Dilatação Linear

Objetivo

Observar o fenômeno da dilatação linear.

Materiais Utilizados

1 fio metálico ($1,5m$ à $2,0m$ de comprimento), 2 suportes, 1 massa, 1 ou mais lamparinas (ou velas), 1 régua.

Montagem e Procedimento

Estenda um fio metálico entre dois pontos de apoio bem fixos. Pendure no meio do fio uma massa qualquer. Meça a distância d entre a massa e a superfície. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(1.26).

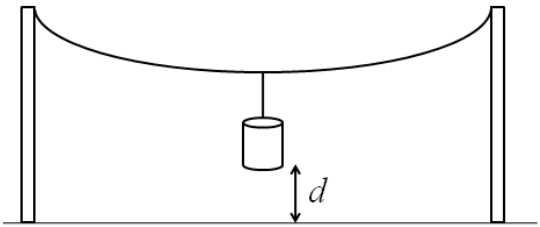

Figura 1.26: Massa suspensa no fio.

Com a lamparina aqueça o fio e verifique como a distância d diminui. Espere o fio esfriar e perceba que a distância d aumenta, voltando à posição inicial.

Análise e Explicação

De maneira geral, ao serem aquecidos todos os corpos têm suas dimensões aumentadas. Esse é o fenômeno chamado dilatação térmica. O aumento da temperatura é associado a uma intensificação da agitação das partículas constituintes dos corpos. Esse aumento das suas velocidades faz com que

elas se desloquem em torno de suas posições médias, afastando-se mais umas das outras e aumentando o espaço entre elas.

De forma semelhante, quando diminui-se a temperatura de um corpo ocorre a sua contração térmica. A diminuição da agitação das partículas faz com que elas se aproximem mais, diminuindo as dimensões volumétricas do corpo.

Considere agora a variação de apenas uma dimensão do corpo. Experimentalmente observa-se que a variação de comprimento (ΔL) é diretamente proporcional ao comprimento inicial (L_0) e a variação de temperatura ($\Delta T = T - T_0$), de modo que ela pode ser representada como:

$$\Delta L = L_0 \alpha (T - T_0) \tag{1.5}$$

onde α é o chamado coeficiente de dilatação térmica linear, cujo valor depende de cada material. A partir de (1.5) vem que o comprimento final (L) é dado por:

$$L = L_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

1.23 Dilatação de uma Dupla Face

Objetivo

Verificar a diferença de dilatação em materiais diferentes.

Material Utilizado

1 vela (ou 1 lamparina), 1 pedaço de papel dupla face (1 face de papel e outra de metal, geralmente alumínio).

Materiais Utilizados

Coloque por alguns segundos o papel dupla face sobre a chama da vela, com a face metálica voltada para baixo. Você notará a tira dupla face se enrolar para cima, como representado na Fig.(1.27).

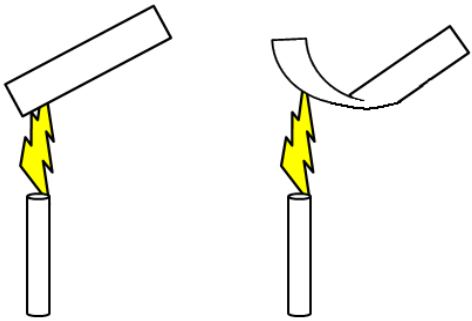

Figura 1.27: Dilatação de uma dupla face.

Análise e Explicação

Ao receber o calor da chama a temperatura da tira aumenta e ela tende a se dilatar. No entanto, a tira é composta por dois materiais diferentes, os quais se dilatam de maneiras diferentes.

Apesar de receberem praticamente a mesma quantidade de calor e sofrerem a mesma variação de temperatura, o metal dilata-se mais que o papel, pois tem coeficiente de dilatação térmica maior. Como o alumínio e o papel estão grudados, a tira se enrola, com o alumínio disposto na parte externa.

1.24 Dilatômetro

Objetivo

Construir um dilatômetro para observar a dilatação linear.

Materiais Utilizados

1 pedaço de arame fino (com cerca de $50cm$ de comprimento), 1 pedaço pequeno de arame grosso, linha, 1 transferidor, 1 suporte de madeira, 1 massa, algumas lamparinas (ou velas), alguns pregos (ou parafusos).

Montagem e Procedimento

O experimento é montado de acordo com o esquema da Fig.(1.28-a).

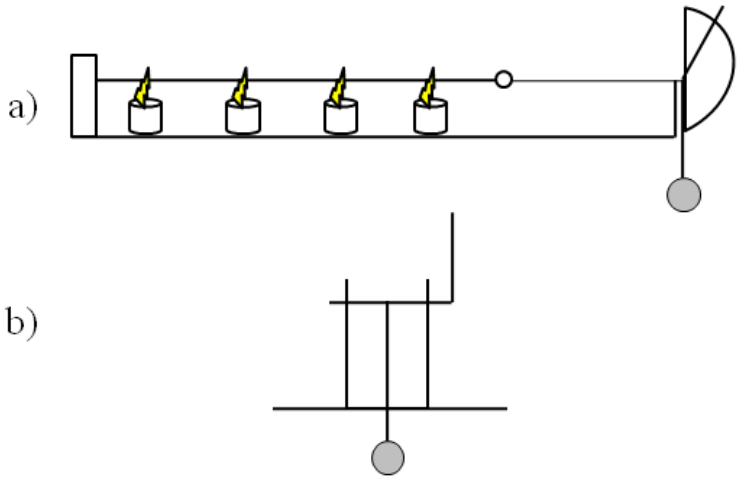

Figura 1.28: Dilatômetro: a- Montagem do experimento; b- Construção do ponteiro.

Fixe o arame numa das extremidades do suporte. No outro lado da base de madeira fixe 2 suportes em forma de chapa, os quais vão sustentar o arame grosso em forma de L. Prenda ao arame uma linha resistente, mas não muito

grossa, e passe-a ao redor do arame em L, dando algumas voltas, e prenda a massa na outra ponta, deixando-a suspensa (Fig.1.28-b). Junto ao suporte do arame em L conecte o transferidor, que vai ajudar na visualização do deslocamento do ponteiro.

Sob o arame coloque algumas lamparinas ou velas e acenda-as, de maneira que as chamas atinjam diretamente o arame. Com o aquecimento do arame você observará o deslocamento do ponteiro.

Análise e Explicação

O aquecimento do arame provoca sua dilatação, fazendo com que, a massa ligada pela linha à ele, desça. Como a linha dá algumas voltas ao redor do arame em L, a descida da massa faz o arame girar, deslocando o ponteiro e evidenciando a ocorrência da dilatação.

Em todos os fenômenos de dilatação, geralmente os efeitos são muito pequenos. Ela somente fica mais visível quando desenvolve-se uma maneira de ampliar o seu efeito, como no experimento aqui realizado.

1.25 Cofre de Gravezande

Objetivo

Verificar a dilatação superficial.

Materiais Utilizados

1 moeda, 1 lata pequena, 1 pegador (ou 1 pinça), 1 lamparina (ou 1 fogareiro).

Montagem e Procedimento

Corte a tampa da lata e faça uma fenda no seu fundo, de modo que a moeda passe exatamente por ela (principalmente em relação ao diâmetro). Aqueça a moeda na chama da vela ou fogareiro segurando-a com a pinça ou pegador. Em seguida coloque a moeda aquecida na fenda da lata e observe que ela não passa. Deixe a moeda esfriar e coloque-a novamente na fenda da lata. Verifique agora que ela acaba passando pela fenda e caindo dentro da lata[6]. Este experimento é denominado cofre de Gravezande (Fig.1.29).

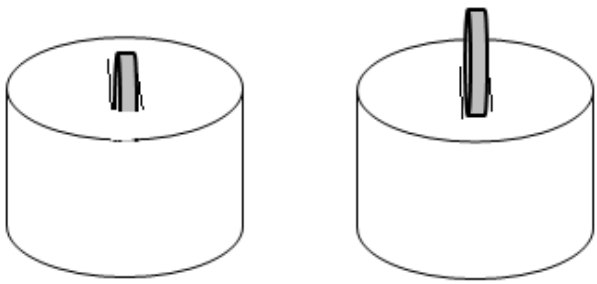

Figura 1.29: Cofre de Gravezande.

Um experimento semelhante também pode ser realizado fazendo um furo com um prego numa chapa, de modo que a cabeça do prego não consiga

[6] A lata deve estar com o fundo, o qual contém a fenda, virado para cima.

passar (por pouca diferença) por ele. Em seguida aqueça bem a chapa e perceba que agora o prego consegue passar pelo orifício.

Análise e Explicação

O que ocorre nesse experimento é o fenômeno da dilatação superficial da moeda. Quando aquecida, a moeda não passa na fenda porque as dimensões do seu corpo aumentaram. Quando a moeda esfria ela se contrai e volta a passar novamente pela fenda da lata. Quanto maior as dimensões dos corpos e quanto maior o aquecimento, mas visível é o fenômeno[7].

Na dilatação superficial, que é a variação da área de um objeto provocado pela variação de temperatura, são observadas as mesmas leis da dilatação linear. Considerando uma placa de área inicial A_0, ao elevar sua temperatura de T_0 à T, o objeto sofre uma dilatação superficial $\Delta A = A - A_0$, dada por:

$$\Delta A = A_0 \beta (T - T_0) \tag{1.6}$$

onde β é o coeficiente de dilatação superficial e seu valor depende do material do qual a placa é feita, tal que $\beta = 2\alpha$. A partir de (1.6) tem-se que a área final (A) do objeto é:

$$A = A_0[1 + \beta(T - T_0)]$$

No caso do aquecimento da chapa metálica, o orifício acaba dilatando (aumentando de tamanho), permitindo que o prego passe totalmente por ele. Um corpo sólido oco sofre dilatação térmica da mesma forma que um sólido maciço, ou seja, como se o seu espaço interno fosse totalmente ocupado pelo mesmo material do restante do corpo.

[7]Neste experimento, de maneira mais acentuada, aumentou o seu diâmetro.

1.26 Anel de Gravezande

Objetivo

Verificar a dilatação volumétrica.

Materiais Utilizados

1 lamparina (ou 1 fogareiro), 1 esfera metálica presa num arame, 1 suporte, 1 anel metálico.

Montagem e Procedimento

Um experimento bem tradicional de dilatação volumétrica é o denominado anel de Gravezande. Uma esfera metálica possui diâmetro que passa exatamente por um anel, o qual se encontra fixado no suporte. Aqueça a esfera, segurando-a pelo arame e tente fazê-la passar novamente pelo anel. Verifique que a mesma não passa. Ela somente vai passar depois que esfriar. Um esquema da montagem e realização do experimento está na Fig.(1.30)

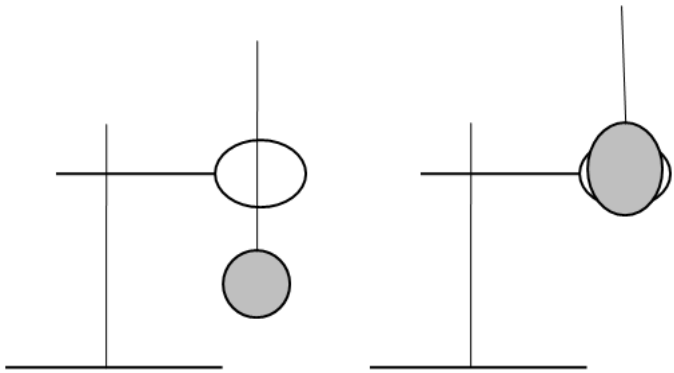

Figura 1.30: Anel de Gravezande.

Análise e Explicação

O que aqui ocorre é a dilatação volumétrica da esfera metálica. Quando aquecida, a esfera não passa no anel (argola) porque aumentou o seu volume. Quando ela esfria ela se contrai e volta a passar novamente pelo anel.

A dilatação volumétrica é a variação do volume de um corpo com a variação da temperatura. Sendo V_0 o volume inicial, V o volume final e $\Delta V = V - V_0$ a variação de volume, tem-se que:

$$\Delta V = V_0 \gamma (T - T_0) \tag{1.7}$$

onde γ é chamado de coeficiente de dilatação volumétrica, tal que $\gamma = 3\alpha$, ou $\gamma = (3/2)\beta$. A partir de (1.7) vem que o volume final é dado por:

$$V = V_0[1 + \gamma(T - T_0)]$$

1.27 Dilatação de Líquidos

Objetivos

Observar o aumento do volume de um líquido com o seu aquecimento e calcular o coeficiente de dilatação volumétrica para diferentes tipos de líquidos.

Materiais Utilizados

1 termômetro, água, álcool, 1 ebulidor elétrico (ou bico de Bunsen[8]), 1 seringa com agulha, 1 rolha de borracha, 1 proveta grande (ou qualquer recipiente graduado), 1 recipiente de vidro com boca fina, 1 recipiente para banho-maria.

Montagem e Procedimento

Encha o recipiente de vidro com água até a boca. Em seguida despeje essa água em uma proveta para medir o seu volume inicial (V_0) e encha novamente o recipiente de vidro, fechando-o com a rolha. Tome cuidado para não deixar bolhas de ar no seu interior. Se necessário, esse ar pode ser retirado introduzindo a agulha da seringa pela rolha e sugando-o.

Retire o êmbolo da seringa e conecte-a ao recipiente, através da introdução da agulha pela rolha. Leve o recipiente com a seringa em um recipiente maior com água para banho-maria. Coloque o termômetro na água desse recipiente e anote a sua temperatura inicial (T_0). A montagem do experimento está representado na Fig.(1.31).

Após isso inicie o aquecimento e vá anotando os valores de temperatura (T) e de volume de água na seringa (V_s), já que, com o aumento da temperatura o líquido vai subindo pela mesma. Recomenda-se obter os dados para a temperatura da água variando entre a temperatura ambiente até cerca de $50°C$ ou $60°C$, pois nesse intervalo a água dilata-se de maneira aproximadamente linear. Retire os dados, por exemplo, com a temperatura variando de $5°C$ e $5°C$, e preencha uma tabela semelhante à Tab.(1.3). O volume inicial (V_0) é

[8] Se dispor de um bico de Bunsen deve usar também um tripé e uma tela de amianto.

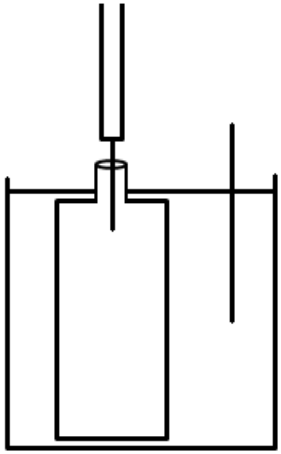

Figura 1.31: Recipiente com água em banho-maria.

o volume do recipiente cheio de água e ΔV é o volume de água dentro da seringa (V_s).

Tabela 1.3: Tabela de Dados.

$T(^\circ C)$	$V_s(ml)$	$(V_0 + \Delta V)(ml)$
T_0	0	V_0
T_1	V_1	$V_0 + V_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Com os dados da Tab.(1.3) construa um gráfico de volume V em função da temperatura T e determine o valor do coeficiente de dilatação volumétrica (γ). Repita o mesmo procedimento com outros tipos de líquidos.

Análise e Explicação

Quando os líquidos são aquecidos, eles sofrem um aumento do seu volume. A dilatação dos líquidos é cerca de 10 vezes maior que a dilatação dos

sólidos, mas mesmo assim é difícil de medí-la diretamente. Por isso, neste experimento interligamos a seringa ao recipiente com o líquido de interesse, com o objetivo de acompanhar o aumento de volume do líquido com a elevação da temperatura. É importante lembrar que foi desprezada a dilatação do recipiente que contém o líquido pois, para uma pequena variação de temperatura, essa dilatação é mínima.

A variação do volume (ΔV) em função da temperatura (T) é dada por:

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T \tag{1.8}$$

onde γ é o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido. Sendo $\Delta V = V - V_0$ e $\Delta T = T - T_0$ vem que o volume total (V) em função de T é:

$$V = V_0[1 + \gamma(T - T_0)]$$

Construindo o gráfico de V em função de T obtém-se algo semelhante ao gráfico da Fig.(1.32).

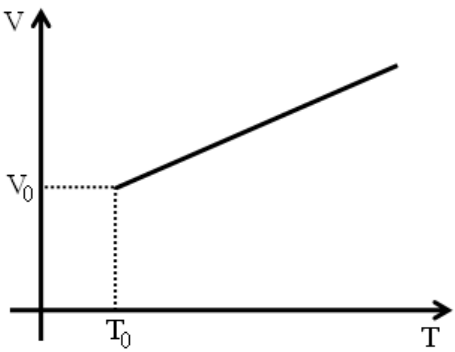

Figura 1.32: Gráfico de $V \times T$.

Diferentes líquidos geram retas de $V \times T$ com diferentes inclinações (são retas desde que γ mantenha-se constante). Quanto maior a inclinação da reta, maior é o valor de γ, significando que ocorre uma maior variação no volume para a mesma variação de temperatura.

O valor de γ obtém-se através da Eq.(1.8), relacionando dois conjuntos de valores da Tab.(1.3):

$$\gamma = \frac{V - V_0}{V_0(T - T_0)}$$

1.28 Termômetro na Água Quente

Objetivo

Acompanhar a descida do mercúrio de um termômetro quando posto em água quente.

Materiais Utilizados

1 recipiente com água, 1 ebulidor elétrico (ou fogareiro), 1 termômetro de mercúrio.

Montagem e Procedimento

Com o ebulidor aqueça a água do recipiente até ela ferver. Introduza o bulbo do termômetro na água quente e perceba que, inicialmente o mercúrio desce um pouco e depois ele sobe até atingir a altura correspondente à temperatura da água. Poderíamos nos perguntar sobre o porquê da descida do filete de mercúrio no termômetro.

Análise e Explicação

Ao ser introduzido na água quente inicialmente a coluna de mercúrio desce um pouco inicialmente porque o bulbo que armazena o mercúrio se dilata mais rapidamente que o próprio mercúrio.

1.29 Propagação de Calor por Condução

Objetivo

Mostrar como ocorre a transmissão de calor por condução.

Materiais Utilizados

1 haste metálica fina (fio grosso), 1 vela, 1 suporte, alguns percevejos.

Montagem e Procedimento

Disponha os percevejos sobre a haste, espaçados de maneira igual um do outro, e prenda-os à haste com um ou dois pingos de parafina. Espere alguns segundos para que a parafina da vela pingada endureça e prenda a haste no suporte, de modo que ela fique disposta horizontalmente, com os percevejos na parte inferior. Em seguida acenda a vela numa extremidade da haste, como representado na Fig.(1.33).

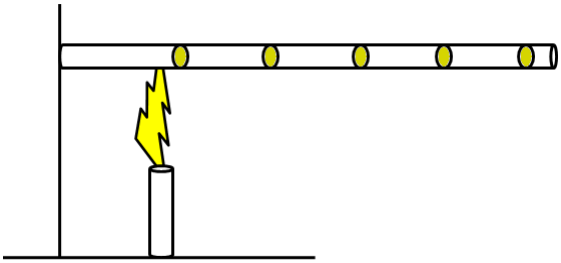

Figura 1.33: Haste metálica com percevejos sendo aquecida.

Após alguns segundos perceba que a parafina começa a derreter e os percevejos começa a cair, iniciando na região mais próxima onde está a chama da vela.

Análise e Explicação

A condução de calor é feita pela agitação dos átomos e transferida sucessivamente de um átomo para outro, sem que esses sofram translação ao longo do corpo (deslocamento de massa). Esse é o tipo de transmissão de calor predominante nos sólidos.

Ao ser aquecida ocorre um aumento de temperatura na extremidade da barra metálica e os átomos passam a vibrar com maior intensidade nessa região. Essa agitação acaba sendo transmitida para outros átomos de outras regiões, fazendo com que o calor se propague pelo material. É isso o que ocorreu no experimento realizado: conforme o calor foi se propagando pela haste, os pingos de parafina nela dispostos foram derretendo.

Dependendo da constituição atômica de uma substância, a agitação térmica poderá ser transmitida de um átomo para outro com maior ou menor facilidade, fazendo com que tal substância seja boa ou má condutora de calor. Alguns materiais, como os metais, conduzem rapidamente o calor, e são denominados condutores térmicos. Outros, como o vidro e a madeira, são maus condutores de calor e são considerados isolantes térmicos.

Numa barra metálica, por exemplo, a velocidade de transmissão de calor por ela é obtida através do fluxo de calor (ϕ), o qual é definido como:

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

onde ΔQ é a quantidade de calor transferida e Δt é o intervalo de tempo. O físico e matemático Jean-Baptiste Fourier constatou que:

$$\phi = k\frac{A(T - T_0)}{L} \tag{1.9}$$

onde L é o comprimento da barra, A a sua área de seção transversal, T e T_0 as temperaturas nas suas extremidades (sendo $T > T_0$) e k o coeficiente de condutividade térmica do material. A Eq.(1.9) é conhecida como Lei de Fourier.

Quanto maior o valor da condutividade térmica k do material, melhor condutor ele será. Por exemplo, o valor de k da prata, um dos melhores condutores de calor, é $0,097 kcal/sm°C$, enquanto do ar, mau condutor de calor, vale $5,7.10^{-6} kcal/sm°C$.

Se no experimento proposto, a haste metálica fosse substituída por uma haste de madeira, não iria ocorrer o derretimento sucessivo dos pingos de parafina. Como a madeira é um material mau condutor de calor, a chama da vela posta numa de suas extremidades iria provocar um aquecimento localizado, queimando-a, mas o calor pouco se propagaria pelo material.

1.30 Propagação de Calor por Convecção

Objetivo

Mostrar como ocorre a transmissão de calor por convecção.

Materiais Utilizados

1 pedaço de lata fina (pode ser uma lata de refrigerante), 1 tesoura, 1 pedaço de linha, 1 compasso, 1 vela, 1 régua.

Montagem e Procedimento

Com o compasso (ou outro objeto circular, como um copo, por exemplo), desenhe uma circunferência na lata e recorte-a com a tesoura. Usando a régua e a ponta da tesoura (ou um estilete), trace a circunferência, dividindo-a em 8 partes. Corte essas partes com a tesoura, deixando um espaço no centro do círculo.

Torça cada uma das partes cortadas de modo a formar um cata-vento. Com a ponta do compasso faça um furinho na parte central e aí prenda um pedaço de linha. Fixe a vela em algum lugar e acenda-a. Segure o cata-vento suspenso pela linha sobre a vela e observe ele girar, como mostra a Fig.(1.34). Pode-se também fazer um experimento semelhante colocando o cata-vento ou uma espira de arame sobre uma lâmpada.

Análise e Explicação

Aqui temos a representação do processo de transmissão de calor por convecção. A convecção é um processo de transmissão de calor acompanhado por deslocamento de massa, e ocorre com os líquidos e os gases.

No experimento, o ar aquecido pela vela sobe e acaba batendo no cata-vento, fazendo-o girar. O ar aquecido sobe porque o aumento da temperatura torna-o menos denso em relação ao ar mais frio que possui maior densidade e tende a descer.

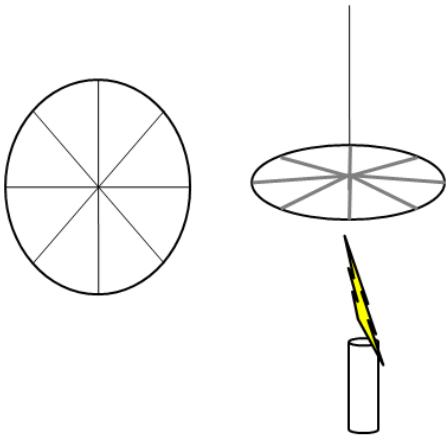

Figura 1.34: Chama da vela movimenta o cata-vento.

1.31 Correntes de Convecção 1

Objetivo

Verificar a existência das correntes de convecção.

Materiais Utilizados

1 béquer, 1 lamparina, 1 tripé com tela de amianto, água.

Montagem e Procedimento

Coloque água no béquer e disponha este sobre a tela de amianto no tripé. Acenda a lamparina sob o tripé e inicie o aquecimento do conjunto. Perceba a existência de uma movimentação da água no béquer durante o aquecimento.

Análise e Explicação

Ao se aquecer um recipiente com água ocorre um movimento ascendente e descendente da massa líquida, devido à propagação de calor por convecção.

Isso ocorre porque a porção do líquido mais próxima da chama, quando aquecida, dilata-se e sobe, por ter a sua densidade diminuída. As camadas mais frias, que inicialmente se encontram na parte superior, são mais densas e se deslocam para o fundo do recipiente, dando sequência ao processo de circulação. Essas correntes de líquido são denominadas correntes de convecção, e estão representadas na Fig.(1.35).

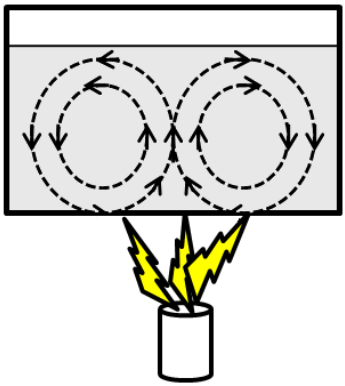

Figura 1.35: Correntes de convecção.

1.32 Correntes de Convecção 2

Objetivo

Verificar a existência das correntes de convecção.

Materiais Utilizados

1 recipiente transparente, 1 ebulidor elétrico, água, liquido leve colorido.

Montagem e Procedimento

Coloque água no recipiente e despeje nela o líquido colorido, de modo que este fique localizado na parte de cima. Introduza o ebulidor na parte superior do recipiente, no meio do líquido colorido. Ligue o ebulidor e perceba que o líquido colorido não desce, não misturando-se com a água (Fig.1.36).

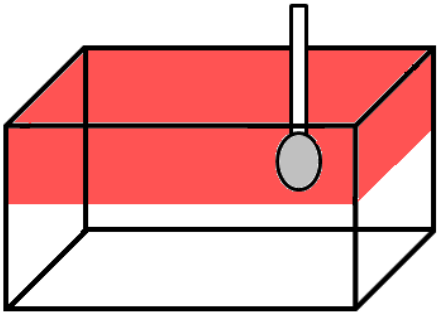

Figura 1.36: Líquido colorido não se mistura.

Uma outra forma de fazer esse experimento é utilizando apenas água e colocando um pedacinho de alguma substância química que gere coloração no ebulidor e repetir o mesmo experimento descrito anteriormente.

Análise e Explicação

A introdução do ebulidor na parte superior da mistura gera correntes de convecção que se propagam entre essa região (onde se encontra o ebulidor)

e a superfície da mistura. As correntes de convecção se movem somente na região do líquido colorido, e por isso ele mantém-se separado do restante da água. O líquido colorido somente vai se misturar com a água se o ebulidor for colocado no fundo do recipiente.

1.33 Convecção de Líquidos

Objetivo

Evidenciar a transferência de calor por deslocamento de massa em um líquido.

Materiais Utilizados

2 latas vazias (de leite em pó, com volume de cerca de $500ml$ à $1L$), 1 ebulidor elétrico, 4 tubos finos de metal ou vidro (mais finos que as manguinhas), 2 conjuntos equipo (aquelas manguinhas de plástico com regulador utilizado para aplicação de soro), conjunto de solda com estanho ou resina epóxi, água.

Montagem e Procedimento

Faça 2 furos em cada lata, cada qual a cerca de uns $2,5cm$ das bordas inferior e superior. A espessura do furo deve ser tal que permita fixar os tubos. Em cada um desses furos solde ou cole os tubinhos de metal ou vidro. É importante que não tenha vazamento. Conecte as manguinhas de plástico com os reguladores nos tubos, interligando as duas latas. O esquema de montagem deste experimento está na Fig.(1.37).

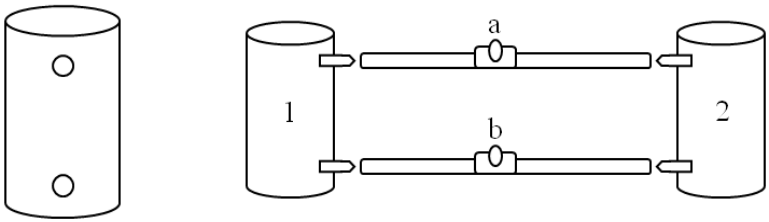

Figura 1.37: Latas conectadas.

Encha as duas latas com água, de modo que o nível fique um pouco acima do tubo superior. Feche os reguladores das manguinhas e coloque o ebulidor

elétrico na lata 1 para ferver a água. Após isso abra as maguinhas e observe a circulação de água. Se for adicionado um corante à água da lata 1 (pode utilizar pó de giz colorido, por exemplo), pode-se visualizar melhor a água quente deslocar-se da lata 1 para a lata 2 pelo tubo superior (a) e a água fria da lata 2 para a lata 1 pelo tubo inferior (b). As duas latas devem ficar à uns $20cm$ à $30cm$ de distância uma da outra.

Análise e Explicação

O ebulidor colocado na lata 1 provoca o aquecimento da água nela contida. Esta torna-se menos densa e acaba se elevando, indo de 1 para 2 pelo tubo condutor (a). Já a água fria que está em 2 vem pela maguinha condutora (b) para o recipiente 1, onde vai ser aquecida, dando continuidade ao processo. Percebe-se que a ocorrência das correntes de convecção deve-se, além da diferença de temperatura, da ação da força da gravidade.

1.34 Vela em Queda Livre

Objetivos

Mostrar a extinção (ou quase extinção) da chama de uma vela em queda livre.

Materiais Utilizados

1 vela, 1 garrafa PET, 1 tesoura (ou 1 estilete), barbante, fósforo.

Montagem e Procedimento

Com a tesoura corte a parte superior da garrafa PET e fixe a vela no seu fundo. Prenda o tubo com um barbante pela parte superior, acenda a vela e solte o conjunto de uma altura de cerca de $3m$ ou mais. Alguém deve ficar em baixo para não deixar o conjunto impactar com o solo. Observe que, durante a queda, a chama da vela se apaga, ou quase se apaga. (Fig.1.38)

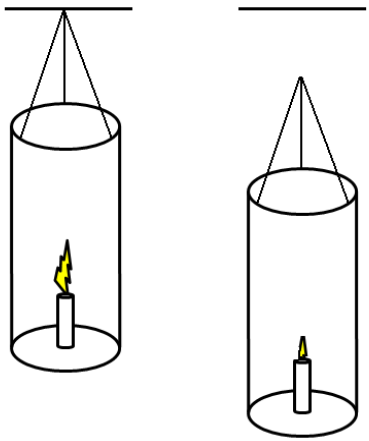

Figura 1.38: Vela em queda livre.

Análise e Explicação

A extinção da chama da vela não ocorre pela falta de ar para combustão, pois o tubo está aberto na parte superior. E nem por correntes de ar que poderiam apagar a vela, pois o ar dentro do tubo está praticamente em repouso em relação à vela.

A vela se apaga devido à extinção das correntes de convecção do ar interno, que sustentam a combustão da vela. Sendo que em queda livre as partículas do ar da chama da vela tem aceleração relativa nula em relação ao tubo, o ar passa a não apresentar peso, fazendo com que desapareça a força de empuxo. Dessa forma, acaba inexistindo as correntes de convecção do ar puro com o ar queimado e a chama acaba se apagando (ou quase se apagando).

1.35 Banho-Maria e Paradoxo

Objetivo

Verificar a existência de um possível paradoxo no aquecimento em banho-maria.

Materiais Utilizados

1 béquer, 1 tubo de ensaio, 1 pegador, 1 fogareiro, 1 tripé com tela de amianto, 1 termômetro, água.

Montagem e Procedimento

Encha o béquer com água. Coloque água no tubo de ensaio, prenda-o com o pegador de madeira e mergulhe-o na água do béquer, de modo que o tubo não encoste na parede nem no fundo do béquer. Coloque o conjunto sobre a tela de amianto e esta sobre o tripé. Sob o tripé coloque e acenda o fogareiro, de modo a aquecer a água do tubo de ensaio em banho-maria. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(1.39).

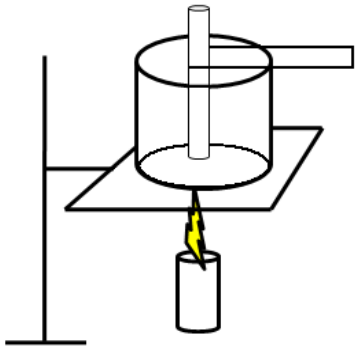

Figura 1.39: Tubo de ensaio com água em banho-maria.

Aqueça o conjunto até a fervura. Observe que a água do béquer ferve, porém, a que está dentro do tubo de ensaio não. Meça a temperatura da água

do béquer e do tubo de ensaio com o termômetro e constate que é a mesma para os dois.

Mas por que a água em banho-maria (contida no tubo de ensaio) não entra em ebulição, sendo que as duas atingem e mesma temperatura?

Análise e Explicação

O banho-maria consiste no aquecimento lento e uniforme de um material colocado em um recipiente cheio de água que vai se aquecendo (podendo ferver). Dessa forma, o material desejado se aquece sem que entre em contato direto com a fonte de calor (a qual pode quebrar o recipiente, queimar, etc.

Quando a água do béquer e do tubo de ensaio entram em equilíbrio térmico (atingem a mesma temperatura), cessa o fluxo de calor entre elas. Para a água entrar em ebulição deve-se fornecer calor adicional quando ela estiver a $100°C$ (ou perto deste valor, dependendo da pressão atmosférica na qual está submetida). Isso somente pode ser feito se estiver próximo a outro objeto a mais de $100°C$. A água do tubo de ensaio somente chega à $100°C$. Se deseja-se ferver a água do tubo de ensaio em banho-maria deve-se colocar no béquer um líquido com ponto de ebulição maior que o ponto de ebulição da água.

1.36 Bolhas na Água em Ebulição

Objetivo

Verificar a formação de bolhas na água em ebulição.

Materiais Utilizados

1 béquer, 1 fogareiro, 1 tripé com tela de amianto, água.

Montagem e Procedimento

Coloque água no béquer e leve o conjunto para aquecimento sobre a tela de amianto, sendo esta disposta sobre o tripé e o fogareiro, Aqueça a água até ela ferver e observe a formação de pequenas bolhas de gás nas paredes e no fundo do béquer, as quais se elevam até a superfície. Mas na verdade, de onde vem essas bolhas?

Análise e Explicação

Quando fornece-se calor a uma substância líquida, aumenta-se a energia de agitação de suas partículas. Dependendo da substância e da pressão a que está sujeita, existe uma temperatura limite, a partir da qual a energia recebida é usada para romper as ligações intermoleculares e o líquido é transformado em vapor. Esse processo é chamado de ebulição.

No ponto de ebulição da água ocorre o rompimento das ligações pontes de hidrogênio entre as moléculas, ocasionando a formação de bolhas de vapor em vários pontos do líquido. Tais bolhas aumentam em volume e quantidade, uma vez que mais moléculas vão ganhando liberdade. As bolhas maiores desprendem-se do fundo, sobem e acabam abandonando o líquido através da superfície.

1.37 Ventilação e Resfriamento

Objetivo

Verificar a aceleração do resfriamento de um líquido com a ventilação.

Materiais Utilizados

2 recipientes (iguais), água aquecida, 2 termômetros, 1 ventilador.

Montagem e Procedimento

Coloque uma mesma quantidade de água aquecida, à mesma temperatura inicial, em 2 recipientes, e introduza 1 termômetro em cada um. Próximo de um dos recipientes coloque o ventilador, de modo que faça vento por um certo tempo, e o outro deixe esfriar naturalmente. Após isso meça a temperatura da água nos 2 recipientes e verifique que ela é menor no copo que foi ventilado. Por que o vento resfria a água?

Análise e Explicação

A velocidade com que um líquido evapora depende de alguns fatores, como a diferença de temperatura entre o líquido e o ambiente, a área da superfície do líquido e a velocidade do ar próximo desta superfície. Quanto maior forem estas, maior será a velocidade de evaporação do líquido.

Durante a evaporação algumas moléculas do vapor, que se localizam próximas á superfície do líquido, incorporam-se novamente ao líquido. Assim, se o número de moléculas no estado do vapor, próximas à superfície, for muito grande, a velocidade de evaporação será pequena, pois muitas dessas moléculas voltam a fase líquida. Diz-se que nesse caso o vapor de água está saturado.

Se esse vapor que vai se formando próximo à superfície do líquido for removido com uma corrente de ar, a velocidade de evaporação aumenta, impedindo a saturação. Por isso que uma roupa molhada seca mais depressa no varal quando está ventando ou o líquido quente num recipiente esfria mais rapidamente quando próximo do ventilador.

1.38 A Chama que se Apaga

Objetivo

Verificar o apagamento da chama de um palito de fósforo com um sopro forte de ar.

Materiais Utilizados

1 caixa de fósforos (com palitos).

Montagem e Procedimento

Acenda um palito de fósforo e observe a formação da chama. Em seguida assopre sobre a chama e observe que ela se apaga. Mas por que a chama se apaga se o sopro fornece mais ar, o que a princípio tenderia a aumentar a eficiência da combustão?

Análise e Explicação

Nos fósforos utilizam-se substâncias químicas que entram em combustão em temperatura relativamente baixa (em torno de $160°C$), a qual é denominada ponto de ignição. Quando assopra-se sobre a chama do fósforo, ocorre uma diminuição rápida da sua temperatura, de modo que esta fica abaixo do ponto de ignição. Isso faz com que a chama se apague.

1.39 Transferência de Calor e Equilíbrio Térmico

Objetivo

Mostrar que a transferência espontânea de calor entre objetos em contato ocorre sempre do que possui maior temperatura para o de menor temperatura, e que o equilíbrio térmico ocorre quando ambos atingem a mesma temperatura.

Materiais Utilizados

1 lata de refrigerante, 1 vasilha (maior que a lata de refrigerante), 2 termômetros, água, 1 pegador, fósforo, 1 lamparina.

Montagem e Procedimento

Coloque água à temperatura ambiente na vasilha. Em seguida despeje água na lata e leve-a com o pegador à chama da lamparina, aquecendo-a. Quando a água da lata estiver quente coloque a lata dentro da vasilha, como representado na Fig.(1.40). Acompanhe a temperatura da água da vasilha e da lata com os termômetros.

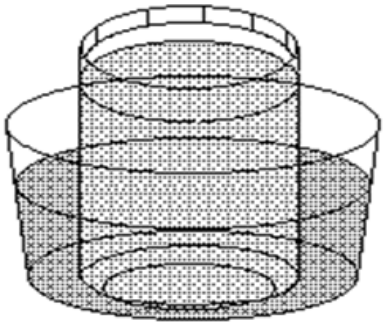

Figura 1.40: Lata na vasilha com água.

Análise e Explicação

Neste experimento constata-se que ocorre uma transferência de energia da água da lata para a água da vasilha. Acompanhando a temperatura com o termômetro nota-se que a temperatura da água da lata diminui e a temperatura da água da vasilha aumenta.

Quando dois corpos à diferentes temperaturas são postos em contato a transferência espontânea de calor ocorre sempre do objeto de maior temperatura para aquele de menor temperatura. Essa transferência de energia ocorre até que as temperaturas se igualem, ou seja, até que os objetos atinjam o equilíbrio térmico.

Considerando o sistema isolado sempre tem-se que:

$$\sum Q = 0$$

ou seja, a quantidade de calor (Q) cedida pelo corpo de maior temperatura é recebida integralmente pelo corpo de temperatura mais baixa, de modo que a soma total das quantidades de calor é nula.

1.40 Sensação Térmica

Objetivo

Relacionar os conceitos de sensação térmica, calor e temperatura.

Materiais Utilizados

3 recipientes, água (em 3 diferentes temperaturas).

Montagem e Procedimento

Em 3 recipientes coloque iguais quantidades de: água fria (recipiente 1), água morna (recipiente 2) e água quente (recipiente 3). Simultaneamente coloque uma das mãos no recipiente 1 e a outra mão no recipiente 3, deixando-as mergulhada por cerca de meio minuto. Em seguida coloque ambas as mãos no recipiente 2, na água com temperatura intermediária as duas anteriores. Apesar de as suas mãos estarem no mesmo recipiente com água, a água morna parecerá fria para a mão que estava na água quente (recipiente 3) e quente para a mão que estava na água fria (recipiente 1).

Análise e Explicação

Esse experimento mostra que o tato não é um bom recurso para determinar a temperatura dos objetos. Isso porque cada mão teve uma sensação diferentes em relação à água morna do recipiente 2.

Ao ser colocada no recipiente 2, a mão que estava no recipiente 1 possui uma temperatura mais baixa, o que faz com que ela receba energia da água. Por isso tem-se a sensação de que a água em 2 está quente. Já a mão que estava no recipiente 3, ao ser colocada no recipiente 2 possui uma temperatura maior, e isso faz com que a mão ceda energia para a água, dando-lhe a sensação de que a água estava fria.

1.41 Condutividade Térmica 1

Objetivo

Verificar a diferença na velocidade de condução de calor em diferentes materiais.

Materiais Utilizados

Diferentes objetos, 1 termômetro.

Montagem e Procedimento

Liste diferentes materiais que estão à sua volta e anote as sensações térmicas (quente ou fria) obtidas pelo tato, ao entrar em contato com cada um deles. Em seguida meça as suas temperaturas com o termômetro e constate que elas são praticamente a mesma para todos eles.

Análise e Explicação

Ao se tocar um objeto o que inicialmente registra-se é a sensação térmica, e não a temperatura. A sensação térmica (frio ou quente) depende da condutividade térmica do objeto tocado. Em um determinado ambiente, uma sala, por exemplo, todos os objetos ficam praticamente na mesma temperatura: a temperatura ambiente.

Quando se toca um objeto bom condutor de calor, um metal, por exemplo, tem-se a impressão que a temperatura é menor que a temperatura dos demais objetos que são mau condutores de calor, como a madeira. Isso acontece porque a nossa sensação de frio ou calor é o fluxo de calor do corpo para o ambiente ou do ambiente para o corpo.

Fluxo de calor é a quantidade de calor que passa de uma região de temperatura maior para uma região de temperatura menor num determinado intervalo de tempo. Quando se toca em um objeto mau condutor de calor, há pouca passagem de calor da pele para o objeto (considerando que a pele está mais quente que o objeto). Além disso, a temperatura da pele se iguala rapi-

damente à temperatura da superfície tocada, pois o objeto é mau condutor de calor e segura em sua superfície o calor recebido.

Quando se toca num objeto bom condutor de calor, há passagem de grande quantidade de calor da pele para o objeto (considerando que a pele está mais quente que o objeto). O fluxo é contínuo, pois o calor que chega da pele à superfície do objeto condutor é conduzido para todo o objeto. Assim, a temperatura da pele só se iguala à temperatura do objeto quando todo o objeto estiver na mesma temperatura que a pele, o que demora um certo tempo. Durante esse tempo, a superfície do objeto continua com a temperatura menor que a da pele, dando-nos a sensação de frio. Processo semelhante ocorre se os objetos tocados estiverem mais quentes que a pele.

1.42 Condutividade Térmica 2

Objetivo

Verificar a diferença de velocidade de condução de calor de diferentes materiais através do tato.

Materiais Utilizados

1 copo de alumínio, 1 copo de vidro, água morna.

Montagem e Procedimento

Coloque uma mesma quantidade de água no copo de alumínio e no copo de vidro. Segure os 2 copos com as mãos e constate que o copo de alumínio parece estar bem mais quente do que o copo de vidro.

Análise e Explicação

O fluxo de calor da água para a mão é maior no copo de alumínio do que no copo de vidro. Por isso tem-se a sensação de que o copo de alumínio está mais quente que o copo de vidro, apesar de inicialmente ambos conterem água à mesma temperatura. O fluxo de calor no copo de vidro é menor porque o vidro não conduz calor tão bem quanto o alumínio.

1.43 Papel que não Queima

Objetivo

Mostrar as condições para que ocorra o início da queima de um papel.

Materiais Utilizados

1 copo metálico, 1 copo de vidro, papel higiênico, fósforo (ou isqueiro).

Montagem e Procedimento

Enrole um pedaço de papel higiênico no copo de vidro e outro no copo metálico e tente colocar fogo no papel. Observe que o papel envolto no copo de vidro pega fogo rapidamente e o no copo metálico não. Por que existe essa diferença se o papel é o mesmo nas duas situações?

Análise e Explicação

O papel envolto no copo metálico não pega fogo facilmente porque o calor gerado pela chama numa região concentrada acaba se espalhando pelo copo, não propiciando a queima.

O mesmo não ocorre com o papel envolto no copo de vidro. O vidro é um mau condutor de calor e isso faz com que o calor da chama incidente no papel fique concentrado, propiciando o início da queima do papel.

1.44 Gelo Embrulhado

Objetivo

Verificar a atuação de um isolante térmico ao ser colocado ao redor de uma pedra de gelo.

Materiais Utilizados

2 pedras de gelo, 1 pedaço de lã.

Montagem e Procedimento

Embrulhe uma pedra de gelo num pedaço de lã e a outra pedra deixe ao ar livre, de preferência num ambiente que esteja quente. Depois de um certo tempo veja qual das duas pedras derreteu mais.

Análise e Explicação

A pedra que estava embrulhada no pedaço de lã derreteu menos, porque a lã é má condutora de calor. Ela atua como um isolante térmico, dificultando o ganho de calor externo pelo gelo e atrasando o seu derretimento.

O mesmo ocorre se enrolarmos uma pedra de gelo com um papel. O calor proveniente do exterior tem de se conduzido através da camada de água que fica armazenada no papel, retardando o fornecimento de calor ao gelo.

1.45 Convecção do Ar Aquecido

Objetivo

Mostrar a convecção do ar aquecido por uma vela.

Materiais Utilizados

1 tubo de vidro (ou plástico transparente, aberto nos dois lados e com uns $3cm$ de diâmetro por $30cm$ de altura), 1 vela (não muito grande), 1 pedaço de papelão (ou cartolina) em formato de T, 1 prato fundo (ou recipiente semelhante), água.

Montagem e Procedimento

Na Fig.(1.41) temos um esquema da montagem do experimento. Fixe uma vela no centro do prato, através do método tradicional de pingar um pouco de cera quente. Despeje água no prato, acenda a vela e coloque o tubo sobre ela. A água veda a entrada de ar pela parte de baixo do tubo. Perceba que em pouco tempo, a vela se apaga. Retire o tubo e acenda a vela novamente. Recoloque o tubo e ponhe o pedaço de papelão cortado em forma de T, como mostra a Fig.(1.41). Veja que desta vez a vela não se apaga.

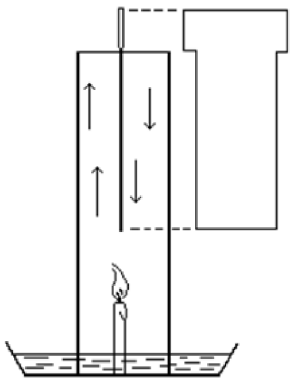

Figura 1.41: Vela dentro do tubo.

Análise e Explicação

A combustão combina o oxigênio do ar com o carbono do pavio da vela. A convecção do gás quente originado da reação desloca-se para a parte superior do tubo e impede a entrada de ar novo, fazendo com que a chama se apague por falta de oxigênio para alimentar a combustão.

A presença do papelão em formato de T dentro do tubo cilindrico estabelece 2 caminhos para os gases envolvidos na combustão. A subida do gás quente por um dos lados do T possibilita a entrada de ar pelo outro lado. Forma-se uma corrente descendente de ar novo por um lado e outra ascendente de gás de combustão (gás carbônico, principalmente) pelo outro lado. Desse modo, o ar é continuamente renovado e a vela não se apaga.

Acenda um incenso e aproxime-o do topo do tubo. Verifique que, de um lado a fumaça sobe, mostrando que de fato há um fluxo ascendente, e do outro a fumaça penetra no tubo, sendo sugada em direção à chama.

O sentido da convecção depende de pequenas assimetrias em torno da extremidade da partição próxima à chama da vela.

1.46 Chamas em Rotação

Objetivo

Verificar a inclinação da chama de uma vela quando posta em um movimento rotação.

Materiais Utilizados

2 velas, 1 balde plástico com cabo, barbante, fósforo.

Montagem e Procedimento

Fixe duas velas no fundo do balde, de modo que elas fiquem diametralmente opostas do centro, como na Fig.(1.42-a).

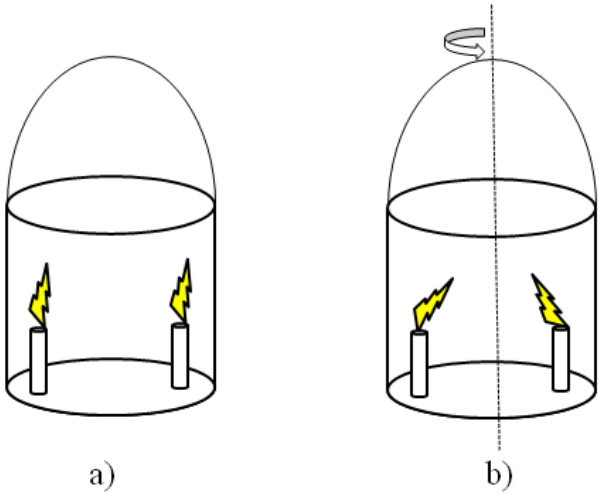

Figura 1.42: Velas: a- Fixadas no fundo do balde; b- Em rotação.

Suspenda o balde pelo cabo, com o auxílio de um barbante, acenda as velas e coloque o conjunto a girar. Observe que a chama da vela se inclina para o eixo central de rotação, como representado na Fig.(1.42-b). Mas por que

isso ocorre? A chama da vela não deveria se inclinar para fora, em respeito ao principio da inércia?

Análise e Explicação

Neste experimento a leis físicas estão sendo devidamente respeitadas e sua explicação está baseada no fenômeno da convecção dos gases provocada pela diferença de densidade entre o gás aquecido e o gás mais frio. O gás aquecido na base da chama desloca-se para a região superior, enquanto o gás mais frio, de maior densidade, desce.

Quando o sistema inicia o movimento de rotação o efeito da aceleração é mais intenso no gás de maior densidade, pois este possui mais inércia. Dessa forma, o gás da região inferior tem maior tendência de permanecer em repouso que o da região superior, fazendo com que o mesmo seja deslocado para a parte externa do movimento circular. Enquanto isso, o ar de menor densidade é deslocado para o centro do disco em rotação.

1.47 Propagação de Calor por Irradiação

Objetivo

Mostrar o fenômeno da transmissão de calor por irradiação.

Materiais Utilizados

1 vela, fósforo (ou isqueiro).

Montagem e Procedimento

Acenda a vela e fixe-a em algum local. Coloque a mão ao lado e embaixo próximo da chama da vela e sinta a temperatura da mão aumentar, como mostra a Fig.(1.43). Como a chama aquece a mão que está ao seu lado se o ar é mau condutor de calor e o ar aquecido tende a se mover para cima?

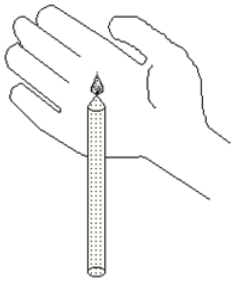

Figura 1.43: Irradiação da chama da vela.

Análise e Explicação

O calor produzido pela chama chega à mão colocada ao lado da vela através da propagação de calor por irradiação. Nesse caso a transmissão de calor por condução é baixa porque o ar é mau condutor térmico. De maneira semelhante a propagação de calor por convecção também é mínima, pois o ar aquecido pela chama sobe em vez de ir para os lados ou para baixo[9].

[9] Por isso que, ao aproximar a mão sobre a chama da vela o aquecimento é maior.

Os corpos emitem radiação térmica a qualquer temperatura acima do zero absoluto e, quanto maior for essa temperatura, maior será a intensidade da radiação emitida. Essas radiações são ondas eletromagnéticas, compostas principalmente por radiações infravermelhas, capazes de se propagarem em qualquer meio, inclusive no vácuo.

Todos os corpos podem irradiar energia, e a quantidade de energia emitida depende da temperatura, da natureza e da forma da superfície do corpo[10]. O calor em forma de radiação se propaga até encontrar matéria, que poderá absorvê-lo.

A energia total de radiação emitida por unidade de tempo (potência P) é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$P = e\sigma AT^4$$

onde e é a emissividade, cujo valor vai de 0 a 1 e depende do corpo, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $\sigma = 5,67.10^{-8} W/m^2K^4$, A é a área do corpo e T é a temperatura (em K). Sendo a intensidade de radiação definida como $I = P/A$, pode-se representar a lei de Stefan-Boltzmann como:

$$I = e\sigma T^4$$

ou seja, para um determinado corpo a intensidade da radiação emitida é proporcional à quarta potência de sua temperatura.

[10]De maneira geral, os corpos escuros possuem alta absorvidade e baixa refletividade, ou seja, são bons absorvedores e emissores de radiação. Já os corpos claros e polidos possuem baixa absorvidade e alta refletividade, sendo maus absorvedores e emissores.

1.48 Balões e Transferência de Calor

Objetivo

Verificar que um balão com água não estoura quando posto sobre a chama de uma vela.

Materiais Utilizados

2 balões de borracha, 1 vela, água.

Montagem e Procedimento

Encha um balão com ar e aproxime-o da chama da vela. Depois, encha o outro balão com um pouco de água e coloque-o sobre a chama[11]. Perceba que o balão com ar estoura facilmente, não acontecendo o mesmo com o balão com água.

Análise e Explicação

Ao se aproximar o balão cheio de ar da chama da vela ele estoura porque o ar é mau condutor térmico. Isso faz com que o calor fornecido pela chama fique localizado e enfraqueça a borracha do balão, levando-o ao rompimento, devido ao fato do mesmo não suportar mais a pressão exercida pelo ar contido no seu interior.

O balão com água não estoura ao ser aproximado da chama (ou pelo menos demora para que isso aconteça) porque a água absorve a maior parte do calor fornecido, não deixando que a temperatura da borracha aumente muito. As moléculas de água em contato com o local em que a chama atinge o balão retiram calor dele e, por convecção, o transmitem para outros pontos do líquido. Por ser fina, a borracha transmite rapidamente para a água o calor recebido da chama, e assim, não dá tempo de a temperatura da borracha se elevar e atingir o ponto de queima. Além disso, como a massa de água é grande e seu calor específico é alto, ela tem capacidade para armazenar

[11] A chama deve incidir na região que contém água.

grande quantidade de energia térmica, o que permite que a chama fique por um longo tempo acesa debaixo do balão sem que ele queime e se rompa.

Um procedimento semelhante de se realizar é despejar água num recipiente de papelão e tentar colocar fogo nele. Observa-se, de maneira semelhante ao balão com água, que tal recipiente não pega fogo porque grande parte do valor fornecido ao papelão é transferido para a água. O papel não pode ser muito espesso pois, se não, ele não consegue transferir calor suficiente e o papel pega fogo.

1.49 Quantidade de Calor, Massa e Temperatura

Objetivo

Verificar a relação entre quantidade de calor, massa e temperatura.

Materiais Utilizados

1 termômetro, 1 cronômetro, 1 balança de precisão, 1 béquer, 1 ebulidor elétrico, água, óleo de cozinha (e outros líquidos).

Montagem e Procedimento

Coloque uma certa quantidade de água no béquer, determine a sua massa com a balança e a sua temperatura com o termômetro. Introduza o ebulidor na água e inicie o seu aquecimento, cronometrando um certo intervalo de tempo. Verifique como a temperatura aumenta nesse período.

Jogue essa água fora, resfrie o béquer à temperatura ambiente e repita o procedimento com a uma quantidade diferente de água (a metade ou o dobro da quantidade inicial seria interessante para comparar). Verifique a temperatura que a água atinge depois de aquecida pelo mesmo intervalo de tempo que no primeiro momento.

Repita o experimento utilizando uma massa de óleo de cozinha igual a massa da água utilizada em um dos experimentos iniciais. Anote todos os dados e compare os resultados. Se achar interessante, utilize também outras substâncias líquidas.

Análise e Explicação

A quantidade de calor (Q) sensível[12] que um corpo recebe ou cede pode ser calculado pela equação fundamental da calorimetria:

$$Q = mc(T - T_0)$$

[12]Calor sensível é o calor que provoca uma variação de temperatura num corpo ou numa certa porção de uma substância.

onde m é a massa, c é o calor específico, e T e T_0 são, respectivamente, as temperaturas final e inicial do corpo.

Sendo $\Delta T = T - T_0$, vem que, quando a temperatura aumenta $\Delta T > 0$, $Q > 0$ (Q positivo). Se a temperatura diminui $\Delta T < 0$, $Q < 0$ (Q é negativo).

Sendo que o calor específico (c) é uma constante característica da substância constituinte do corpo, pode-se dizer que, para uma mesma variação de temperatura (ΔT), a quantidade de calor (Q) é diretamente proporcional à massa (m) do corpo:

$$Q \propto m$$

Além disso, para um mesmo corpo (mesma massa), a variação de temperatura (ΔT) é proporcional à quantidade de calor (Q) recebida ou cedida por ele:

$$\Delta T \propto Q$$

1.50 Capacidade Térmica de um Calorímetro

Objetivo

Determinar a capacidade térmica de um calorímetro.

Materiais Utilizados

1 calorímetro, 1 termômetro, água, 1 ebulidor elétrico, 1 balança de precisão, 2 béqueres.

Montagem e Procedimento

Meça na balança uma certa quantidade de água à temperatura ambiente e despeje-a dentro do calorímetro. Disperse a água dentro do calorímetro de modo que ambos alcancem o equilíbrio térmico e meça a temperatura da água com o termômetro.

Esquente uma outra porção de água com o ebulidor (ou outro meio) e meça a sua massa. Determine a sua temperatura com o termômetro e despeje-a rapidamente dentro do calorímetro, fechando-o em seguida. Agite um pouco o calorímetro de modo que ocorra um equilíbrio térmico entre as águas de diferentes temperaturas e determine a temperatura final do conjunto, mergulhando o termômetro na água.

Conhecendo as massas e as temperaturas iniciais das duas quantidades de águas, bem como a temperatura final do equilíbrio, determine a capacidade térmica do calorímetro baseando-se no conceito da conservação da energia térmica.

Análise e Explicação

O calorímetro é um tipo de recipiente termicamente isolado, semelhante a uma garrafa térmica, que evita as trocas de calor entre o seu conteúdo e o meio externo. Um calorímetro ideal não deveria trocar calor com os corpos de seu interior, mas na prática isso não ocorre.

Num sistema de vários corpos, termicamente isolados do meio externo, as trocas de calor ocorrem apenas entre seus integrantes. Assim, toda ener-

gia térmica cedida por alguns corpos é absorvida por outros pertencentes ao próprio sistema, de modo que:

$$\sum Q = 0 \tag{1.10}$$

Sendo Q_1 a quantidade de calor da água fria, Q_2 a quantidade de calor da água quente e Q_c a quantidade de calor absorvida pelo calorímetro, a partir de (1.10) vem que:

$$Q_1 + Q_2 + Q_{cal} = 0 \tag{1.11}$$

Seja $Q = mc\Delta t$ a quantidade de calor sensível e $C = Q/\Delta T$ a capacidade térmica, pode-se escrever a relação (1.11) como:

$$m_1c(T - T_1) + m_2c(T - T_2) + C(T - T_0) = 0 \tag{1.12}$$

onde T_1, T_2 e T_0 são as temperatura iniciais, respectivamente, da água fria, da água quente e do calorímetro e T é a temperatura de equilíbrio.

No experimento sugerido, $T_0 = T_1$, de modo que (1.12) pode ser escrita como:

$$(m_1c + C)(T - T_1) + m_2c(T - T_2) = 0 \tag{1.13}$$

No experimento realizado (2 vezes) obteve-se os seguintes dados:

Dados 1: $m_1 = 81,61g$, $m_2 = 80,31g$, $T_1 = 12,0°C$, $T_2 = 40,0°C$, $T = 25,0°C$. Levando esses dados na Eq.(1.13) e utilizando o calor específico da água como sendo $c = 1cal/g°C$, obteve-se $C = 11,06cal/°C$.

Dados 2: $m_1 = 61,54g$, $m_2 = 69,79g$, $T_1 = 19,5°C$, $T_2 = 45,0°C$, $T = 32,5°C$. De maneira semelhante obteve-se $C = 11,04cal/°C$.

Fazendo uma média dos 2 valores, conclui-se que a capacidade térmica do calorímetro utilizado no experimento é $C = 11,05cal/°C$.

1.51 Calor Específico de um Sólido

Objetivo

Determinar o calor específico de um sólido metálico.

Materiais Utilizados

1 béquer, 1 balança de precisão, água, 1 termômetro, barbante, 1 corpo metálico (como uma porca de parafuso, por exemplo), 1 ebulidor elétrico, 1 calorímetro (o mesmo do experimento anterior).

Montagem e Procedimento

Inicialmente meça a massa do objeto metálico com a balança. Em seguida amarre-a com o barbante para facilitar o seu manejo.

Coloque uma certa quantidade de água à temperatura ambiente no calorímetro e meça a sua temperatura. Introduza o objeto metálico no béquer com água e aqueça o conjunto com o ebulidor elétrico até atingir uma temperatura próxima da temperatura de ebulição. Meça a temperatura da água com o termômetro, a qual será também a temperatura do objeto metálico.

Retire o objeto metálico da água segurando-o pelo barbante e rapidamente coloque-o no interior do calorímetro, tampando-o em seguida. Agite levemente o calorímetro, de modo que a água e o metal atinjam o equilíbrio térmico. Introduza o termômetro no seu interior e meça essa temperatura de equilíbrio. Repita esse procedimento 2 ou mais vezes para cada objeto metálico. Obtenha dados experimentais e determine o calor específico do material metálico.

Análise e Explicação

O calor específico do metal é encontrado utilizando o principio de conservação de energia ou da quantidade de calor, de modo que:

$$\sum Q = 0 \tag{1.14}$$

No experimento utilizou-se um bloco de alumínio (Al). No equilíbrio térmico dentro do calorímetro, a partir de (1.14) tem-se que:

$$Q_{água} + Q_{Al} + Q_{cal} = 0$$

ou:

$$[mc(T - T_0)]_{água} + [mc(T - T_0)]_{Al} + [C(T - T_0)]_{cal} = 0 \qquad (1.15)$$

A capacidade térmica do calorímetro é a mesma encontrada no experimento anterior.

Os dados obtidos foram:

Dados 1: $m_{água} = 74,64g, m_{Al} = 18,32g, T_0(Al) = 21,0°C, T_0(água) = 10,5°C$, $T = 11,0°C$, $C = 11,05cal/°C$. Substituindo esses dados na Eq.(1.15) obteve-se $c = 0,17cal/g°C$.

Dados 2: $m_{água} = 52,26g, m_{Al} = 18,32g, T_0(Al) = 41,0°C, T_0(água) = 12,0°C$, $T = 14,0°C$, $C = 11,05cal/°C$. De maneira semelhante obteve-se $c = 0,26cal/g°C$.

Uma média dos 2 valores encontrados nos conduz à $c = 0,215cal/g°C$ como sendo o calor específico do alumínio, bem próximo do valor tabelado de $c = 0,22cal/g°C$.

1.52 Calor Específico de um Líquido

Objetivo

Determinar o calor específico de um líquido, comparando-o com o calor específico da água.

Materiais Utilizados

1 termômetro, 1 ebulidor elétrico, 1 balança de precisão (se for conhecida a densidade do líquido pode-se usar uma proveta e determinar a sua massa através da medida do volume), água, 2 béqueres, óleo de cozinha (ou outro líquido).

Montagem e Procedimento

Coloque uma certa quantidade de água num béquer, medindo a sua massa. Coloque a mesma massa de óleo no outro béquer. Meça a temperatura inicial da água e aqueça-a por um determinado intervalo de tempo, introduzindo o ebulidor no seu interior e registre a sua temperatura final. De maneira semelhante, aqueça o óleo no béquer por um intervalo de tempo igual ao usado para aquecer a água, anotando as temperaturas inicial e final.

Conhecendo-se as variações de temperatura da água e do óleo, bem como o calor específico da água, encontre o calor específico do óleo.

Análise e Explicação

Como a potência do ebulidor se mantém constante durante o aquecimento, a água e o óleo recebem a mesma quantidade de calor. As quantidades de calor recebidas pelo água e pelo óleo, respectivamente são dadas por:

$$Q_{água} = m_{água} c_{água} (T - T_0)_{água} \tag{1.16}$$

$$Q_{óleo} = m_{óleo} c_{óleo} (T - T_0)_{óleo} \tag{1.17}$$

Sendo $Q_{água} = Q_{óleo}$ e $m_{água} = m_{óleo}$, de (1.16) e (1.17) vem que:

$$c_{água} (T - T_0)_{água} = c_{óleo} (T - T_0)_{óleo} \tag{1.18}$$

Sabendo que $c_{água} = 1cal/g^{\circ}C$, a partir de (1.18) tem-se que o calor específico do óleo é determinado pela relação:

$$c_{óleo} = \frac{(T - T_0)_{água}}{(T - T_0)_{óleo}}$$

1.53 Formação de Brisas

Objetivo

Mostrar como ocorre a formação das brisas.

Materiais Utilizados

1 fogareiro, gelo, areia, 2 vasilhas metálicas, fósforo, 1 vela.

Montagem e Procedimento

Encha uma das vasilhas com areia e aqueça-a sobre o fogareiro. Na outra vasilha coloque gelo. Depois da vasilha com areia estar aquecida coloque as 2 vasilhas próximas (tome cuidado para não queimar a base de apoio). Acenda uma vela e fixe-a entre as vasilhas e observe que a fumaça por ela produzida se desloca sobre a vasilha com areia quente, como representado na Fig.(1.44).

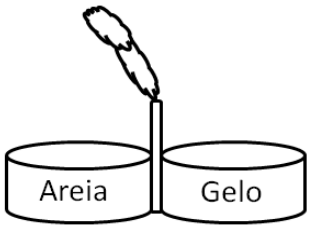

Figura 1.44: Vela acesa entre uma vasilha com areia quente e outra com gelo.

Análise e Explicação

A areia quente aquece o ar sobre ela, o que faz com que este tenha uma pressão relativamente menor do que o ar mais frio localizado sobre a vasilha com gelo. Essa diferença de pressão induz o deslocamento da fumaça da região de maior pressão para a região de menor pressão. Este experimento é muito importante para explicar os fenômenos de brisas que ocorrem na

terra. As circulações convencionais[13] de ar surgem devido ao aquecimento diferencial, como a circulação de brisa marítima/ terrestre.

Durante o dia a areia quente aquece o ar sobre ela, o que faz com que este adquira uma pressão relativamente menor do que o ar mais frio localizado sobre o mar e suba. Com isso o ar próximo à superfície da água movimenta-se horizontalmente do mar para a terra, formando a chamada brisa marítima.

Durante a noite ocorre o oposto. A areia também esfria mais rapidamente que a água do mar, o que faz com que a pressão do ar sobre a praia (e o continente, de modo geral) seja maior que a pressão sobre o mar, provocando a brisa terrestre, que é uma corrente de ar da praia para o mar. O fato da areia esfriar e esquentar mais rapidamente que a água deve-se ao fato dela possuir um calor específico menor que o da água.

[13] As circulações podem ser também as não-convencionais, como as induzidas por diferenças de umidade do solo ou da vegetação.

1.54 Temperatura e Mudanças de Estados Físicos

Objetivo

Acompanhar o comportamento da temperatura na mudança de estados físicos da matéria.

Materiais Utilizados

1 béquer, 1 termômetro, 1 cronômetro, gelo, 1 lamparina, 1 tripé com tela de amianto.

Montagem e Procedimento

Adicione o gelo (picado) no béquer e introduza o termômetro no meio do gelo para acompanhar a sua temperatura. Coloque o béquer para aquecer sobre a tela de amianto e faça a leitura da temperatura da água no decorrer do tempo, em intervalos de tempos iguais. Aqueça a água, inicialmente no estado sólido, fazendo-a passar para o estado líquido, até o estado gasoso, fazendo com que uma certa quantidade tenha evaporado. Com os dados obtidos desenhe um gráfico da temperatura (T) da água em função do tempo (t).

Análise e Explicação

Ao aborver calor o gelo aumentará sua temperatura até atingir determinada temperatura em que ocorre uma mudança de estado físico. Ao mudar do estado sólido para o estado líquido, num processo chamado fusão, o gelo continua recebendo calor, mas sua temperatura permanece constante. O valor dessa temperatura é característica dessa substância e é denominado ponto de fusão, sendo $0°C$ para o gelo. Durante a fusão coexistem as fases sólida e líquida da água.

Após toda a água estar no estado líquido ela começa a aumentar novamente sua temperatura, até chegar aos $100°C$ (ao nível do mar). Nessa temperatura, denominado ponto de ebulição, ocorre a passagem do estado líquido para o estado gasoso e a água continua recebendo calor, mas sua temperatura

permanece constante até que todo o líquido tiver evaporado. Processo semelhante ocorre para outras substâncias.

A representação gráfica da temperatura da água (T) em função do tempo (t), desde o estado sólido até o aquecimento do vapor (o que não ocorre neste experimento, que vai até a ebulição de uma parte da água), está representada na Fig.(1.45).

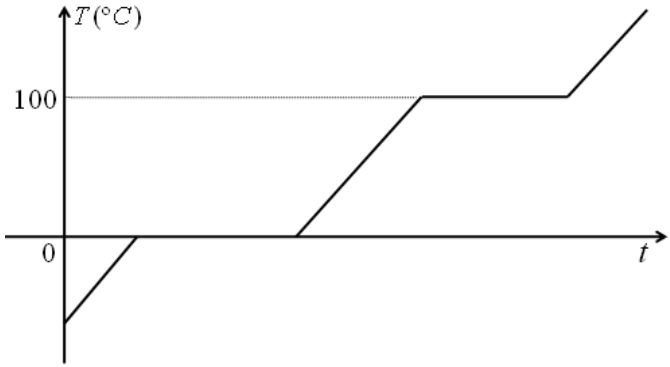

Figura 1.45: $T \times t$ no aquecimento da água.

1.55 Estudando a Solidificação da Água

Objetivo

Analisar o processo de solidificação da água.

Materiais Utilizados

1 recipiente de isopor, gelo picado, sal fino, 1 tudo de ensaio (ou uma lata de refrigerante), 1 termômetro.

Montagem e Procedimento

Coloque o gelo picado misturado com o sal no recipiente de isopor e introduza nele o tubo de ensaio com a água e o termômetro. Acompanhe a temperatura da água no decorrer do tempo.

Análise e Explicação

Depois de certo tempo espera-se que a água no estado líquido tenha se transformado em gelo com a temperatura bem abaixo de $0°C$. Com a imersão do tubo com água, o calor flui do tubo para mistura e a temperatura da água diminui para $0°C$, quando começa a sua solidificação. Essa temperatura permanece constante até que toda a água se solidifique. A partir desse ponto o gelo formado pode atingir temperaturas inferiores a $0°C$.

O caráter irregular do congelamento da água é responsável por preservar a vida nos mares, lagos e rios que congelam parcialmente no inverno. A água apresenta densidade máxima em $4°C$. Por isso, à medida que a temperatura abaixa aquém de $4°C$, a água localizada na superfície reduz sua densidade a valores menores que o máximo, ficando retida na superfície. Por isso que o congelamento nos grandes lagos e mares é apenas superficial, permitindo que a vida aquática permaneça viva até a chegada da estação quente, quando o gelo começa a derreter.

1.56 Ponto de Orvalho

Objetivo

Verificar a condensação do vapor de água.

Materiais Utilizados

1 copo de vidro, 1 termômetro, gelo, 1 bastão, água.

Montagem e Procedimento

Coloque um pouco de água no copo e nela introduza pequenos pedaços de gelo. A superfície externa do copo deve estar bem seca. Agite as pedras de gelo dentro da água, e com o termômetro, acompanhe a temperatura da mistura. Perceba a existência de água líquida na superfície externa do copo.

Análise e Explicação

O gelo se funde e a temperatura do sistema (recipiente + água) diminui pois, para fundir, o gelo retira calor da água e esta do copo. A uma determinada temperatura a superfície externa do tubo começa a ficar coberta de gotículas de água. Essa temperatura é denominada ponto de orvalho.

O ar é uma mistura de gases, como o oxigênio e o nitrogênio, e certa quantidade de vapor de água. Ao abaixar a temperatura ocorre a condensação do vapor de água nele presente, que passa do estado gasoso para o estado líquido.

Quando o ar se apresenta com elevado grau de umidade (grande porcentagem de vapor de água), pode ocorrer a condensação do vapor de água, mesmo a temperatura ambiente. É o que ocorre nos espelhos de vidros em um banheiro após um banho quente que satura o ambiente com vapor de água.

1.57 Calor Latente

Objetivo

Determinar o calor latente de fusão do gelo.

Materiais Utilizados

1 calorímetro, água, gelo, 1 béquer, 1 proveta, 1 termômetro, 1 ebulidor elétrico.

Montagem e Procedimento

Coloque uma certa quantidade de água no béquer ($100ml$ à $200ml$), cuja massa é medida com uma balança ou uma proveta. Com o ebulidor aqueça esta água até $50°C$ ou $60°C$. Despeje a água quente no calorímetro (o mesmo utilizado nos experimentos anteriores) e meça a temperatura de equilíbrio.

Em seguida coloque uma certa quantidade de gelo (cerca de $1/3$ ou $1/4$ da massa de água), o qual deve estar derretendo, dentro do calorímetro. A massa de gelo vai ser determinada posteriormente. Rapidamente tampe o calorímetro e agite-o vagarosamente até ocorrer o equilíbrio térmico. Introduza o termômetro no seu interior e obtenha a temperatura final de equilíbrio. Despeje a água do calorímetro na proveta e obtenha a massa total de água. A massa de gelo que foi utilizada é obtida subtraindo deste valor a massa inicial de água quente.

Com esses dados determine o calor latente de fusão do gelo.

Análise e Explicação

Calor latente (L) é a quantidade de calor (Q) necessário que uma unidade de massa (m) de determinada substância deve receber ou ceder para sofrer uma mudança de estado físico, e é dado por:

$$L = \frac{Q}{m}$$

O calor latente pode ser de fusão ou de ebulição, e cada qual tem um valor diferente para uma mesma substância.

Ao ser colocado no calorímetro o gelo recebe calor da água aquecida. Este calor é usado inicialmente para derreter o gelo e depois, se tiver calor disponível, para aumentar a temperatura da água líquida.

No equilíbrio térmico tem-se que:

$$Q_a + Q_C + Q_g + Q_{ag} = 0 \tag{1.19}$$

onde Q_a, Q_C, Q_g e Q_{ag} são as quantidades de calor correspondentes, respectivamente, à água aquecida, ao calorímetro, ao gelo em fusão e à água do gelo fundido.

Usando as definições de calor sensível e calor latente, pode-se escrever a Eq.(1.19) como:

$$[mc(T - T_0)]_a + [C(T - T_0)]_C + (mL)_g + [mc(T - T_0)]_{ag} = 0 \tag{1.20}$$

onde L é o calor latente de fusão do gelo.

A capacidade térmica (C) do calorímetro é conhecida dos experimentos anteriores. O calor específico da água é igual à unidade ($c = 1cal/g°C$) e o valor de T_0 do último termo do primeiro membro da Eq.(1.20) é igual à 0 ($T_0 = 0$), pois a temperatura de fusão do gelo é igual à $0°C$. Daí tem-se que:

$$m_a(T - T_0)_a + C(T - T_0)_C + m_g L + m_g T = 0 \tag{1.21}$$

Sendo $(T - T_0)_C = (T - T_0)_a$, a Eq.(1.21) fica:

$$m_g L = -\left[m_g T + C(T - T_0) + m_a(T - T_0)\right]$$

onde T_0 é a temperatura inicial da água dentro do calorímetro e T a temperatura final de equilíbrio. Daí vem que:

$$L = \frac{C(T_0 - T) + m_a(T_0 - T) - m_g T}{m_g}$$

O experimento deve ser repetido algumas vezes e calculado o valor médio de L. O valor teórico é $L = 80cal/g$.

1.58 Derretendo Gelo com Sal

Objetivo

Derreter gelo através da adição de sal.

Materiais Utilizados

Gelo, sal.

Montagem e Procedimento

Jogue sal sobre o gelo e observe que ele derrete. Por que isso ocorre?

Análise e Explicação

Quando joga-se sal na água, é preciso retirar mais calor da mistura para ela congelar e, dessa forma, baixa-se a sua temperatura de congelamento. O sal aumenta também a temperatura de ebulição da água. Como as moléculas de água são atraídas pelo sal, elas têm de se mover mais depressa que o normal para alcançarem o estado de vapor.

Numa solução as partículas do soluto atrapalha a movimentação das partículas do solvente e alteram algumas de suas propriedades, como a temperatura de solidificação. O abaixamento da temperatura de solidificação da solução é chamado efeito crioscópico.

Quando mistura-se sal ao gelo a temperatura de solidificação da água diminui. Por exemplo, uma solução com 10% de sal congela à $-6°C$ e uma solução com 20% congela à $-16°C$.

Com o objetivo de abaixar o ponto de solidificação da água adiciona-se compostos no combustível ou na água do radiador de automóveis em países de clima muito frio, para evitar danos no motor.

1.59 Evaporação de um Líquido

Objetivo

Verificar o processo de evaporação de diferentes líquidos.

Materiais Utilizados

Água, álcool.

Montagem e Procedimento

Pingue na mão, em locais separados, uma gota de álcool e uma gota de água, ambos à mesma temperatura. Perceba que você sentirá mais frio no local onde pingou o álcool. Por que essa diferença, se os dois possuem a mesma temperatura.

Um experimento semelhante pode ser realizado molhando o bulbo de um termômetro com álcool e o outro com água. Agite-os em seguida e observe em qual deles diminui mais a temperatura.

Análise e Explicação

O álcool é mais volátil que a água, por isso evapora mais rapidamente. Para passar do estado líquido para o estado gasoso uma substância necessita de energia. No experimento realizado, essa energia é absorvida da pele, dando a sensação de frio. Essa sensação de frio é maior no líquido que evapora mais rapidamente.

A vaporização, de uma maneira geral, é um fenômeno estatístico. A matéria gasosa pode ser compreendida como um conjunto de muitas partículas isoladas, distanciadas umas das outras, as quais movimentam-se a grandes velocidades de maneira constante e caótica. Cada partícula desloca-se a uma certa velocidade e a temperatura do gás é determinada pela energia cinética média das partículas. A energia das partículas de um gás é dada pela distribuição de Boltzmann, que está representada na Fig.(1.46).

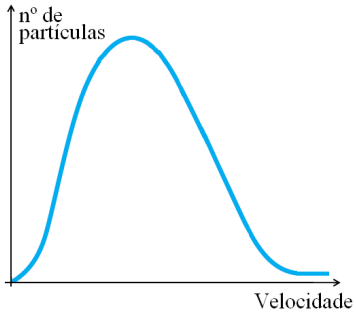

Figura 1.46: Distribuição de Boltzmann.

Em uma dada temperatura sempre há partículas rápidas e partículas lentas, de modo que a qualquer temperatura[14] é possível que elas tenham energia suficiente para ir para o estado gasoso. Conforme aumenta-se a temperatura as moléculas ganham maiores velocidades, e a curva da Fig.(1.46) vai se deslocando para a direita. A probabilidade de uma partícula passar do estado líquido para o estado de vapor aumenta à medida que a temperatura do sistema se aproxima do ponto de ebulição da substância.

[14]Temperatura acima do zero absoluto.

1.60 Resfriamento do Frasco de Aerossol

Objetivo

Verificar o resfriamento do frasco de um aerossol quando o mesmo é chacoalhado.

Materiais Utilizados

1 frasco de aerossol (não vazio, podendo ser de antitranspirante, creme de barbear, tinta, inseticida, etc.).

Montagem e Procedimento

Segure firme o frasco de aerossol na mão e chacoalhe-o. Sinta o resfriamento do frasco de lata.

Análise e Explicação

Por definição, um aerossol é uma suspensão de partículas microscópicas sólidas ou fluídas em ar ou gás, como na fumaça ou na neblina.

Num recipiente de aerossol existe uma mistura de dois líquidos, sendo um deles o produto (antitranspirante, etc.) e o outro o propelente, que é uma substância capaz de impulsionar o produto para fora. O propelente geralmente é um gás liquefeito[15], o que faz com que o aerossol saia com a força de um jato sempre que acionado o *spray*.

Dentro do recipiente a pressão é tão grande que o gás usado como propelente fica comprimido e se transforma em líquido, misturando-se ao produto. Quando a válvula é apertada, a pressão dentro do frasco diminui e uma parte do líquido se expande, virando gás e saindo do frasco.

Quando chacoalha-se o frasco, as moléculas do gás liquefeito se agitam, fazendo com que parte delas arrumem espaço dentro do próprio recipiente para se expandir. Para passar do estado líquido para o estado gasoso, qualquer substância precisa extrair energia de algum lugar e, neste caso, essa energia vem da lata. Por isso que a sua temperatura diminui (a lata fica gelada). Num

[15] O propelente é GLP (gás liquefeito de petróleo), sendo geralmente o butano.

aerossol o frasco é sempre metálico, pois isso permite que o mesmo consiga transferir energia para o líquido.

1.61 Sublimação

Objetivo

Verificar o fenômeno da sublimação.

Materiais Utilizados

1 bolinha de naftalina.

Montagem e Procedimento

Aqueça uma bolinha de naftalina e verifique que ela não derrete, mas sim, evapora diretamente sem passar pelo estado líquido.

Análise e Explicação

Sublimação é a passagem do estado sólido diretamente para o gasoso de uma substância, sem passar pelo estado líquido. São poucas as substâncias que sublimam nas condições ambientes. Entre elas está a naftalina[16]. No entanto, verifica-se que esse fenômeno pode ocorrer com qualquer substância, dependendo da temperatura e pressão a que ela estiver submetida. A passagem do estado gasoso para o sólido é chamada de ressublimação.

O ponto de sublimação, assim como o ponto de ebulição e o ponto de fusão, é definido como o ponto no qual a pressão de vapor do sólido se iguala a pressão aplicada. A sublimação é característica de substâncias que possuem pressão de vapor no ponto de fusão maior que a pressão atmosférica. Com isso, na pressão atmosférica a substância desenvolve pressão de vapor suficiente para vaporizar completamente.

O gelo-seco também é uma substância que sublima. Ele é utilizado em carrinhos de sorvete, já que sua temperatura é menor do que a do gelo comum e não molha as embalagens (pois não passa para o estado líquido). Ele também é utilizado para gerar uma espécie de fumaça em shows. Pedaços de gelo-seco são colocados em um recipiente com água e as partículas gasosas

[16] Por isso as bolinhas acabam desaparecendo com o tempo quando expostas

de CO_2 desprendem-se na sublimação e levam pequenas gotas de água, criando o efeito da fumaça. O CO_2 passa de gasoso para sólido ao ser resfriado a $-80°C$.

1.62 Calefação 1

Objetivo

Demonstrar o fenômeno da calefação.

Materiais Utilizados

1 frigideira (ou qualquer outro recipiente metálico), 1 fonte de calor intensa, água.

Montagem e Procedimento

Borrife gotas de água numa frigideira bem quente e seca e veja que elas começam a vibrar e a deslizar pela superfície da frigideira durante a vaporização.

Análise e Explicação

A calefação é uma vaporização forçada, pois esta realiza-se em uma temperatura acima do ponto de ebulição. A vaporização é tão rápida que os pingos de água nem chegam a tocar completamente o fundo da frigideira. Eles movimentam-se sobre uma camada de moléculas vaporizadas até dissiparem-se completamente.

Quando a gota de água toca uma frigideira muito quente, a sua parte inferior vaporiza-se instantaneamente, formando uma camada de vapor entre a frigideira e a gota de água. Essa camada de vapor protege a gota durante um certo intervalo de tempo, fazendo-a dançar e deslizar sobre a frigideira. Ela só se tornará vapor depois de um certo tempo. O mais interessante é que, se a frigideira estiver menos aquecida, as gotas desaparecem mais rapidamente.

Devido ao fato do vapor d'água possuir um alto calor de condensação, ele pode fornecer uma grande quantidade de energia ao ambiente sob forma de calor. Por isso usa-se a calefação para o aquecimento do interior de residências em alguns países muito frios.

1.63 Calefação 2

Objetivo

Mostrar que na calefação a substância aquecida não encosta no recipiente.

Materiais Utilizados

1 fonte de calor intensa (bico de Bunsen), 1 tela de amianto, 1 tripé (ou suporte universal), 1 recipiente metálico pequeno, 1 pilha ou bateria, 1 lâmpada (compatível com a tensão da pilha ou bateria), água, ácido (pode ser suco de limão, vinagre ou qualquer outra coisa que contenha ácido em baixa concentração), fios para conexões elétricas, 1 termômetro.

Montagem e Procedimento

O experimento é realizado de acordo com o esquema da Fig.(1.47). Monte o tripé ou suporte com a tela de amianto e coloque o recipiente metálico sobre o fogo para aquecê-lo bastante. A temperatura pode ser acompanhada utilizando o termômetro. Construa um circuito elétrico com a pilha conectada à lâmpada, e outra extremidade fixa do recipiente metálico. A extremidade que fecha o circuito será colocada na solução dentro do recipiente.

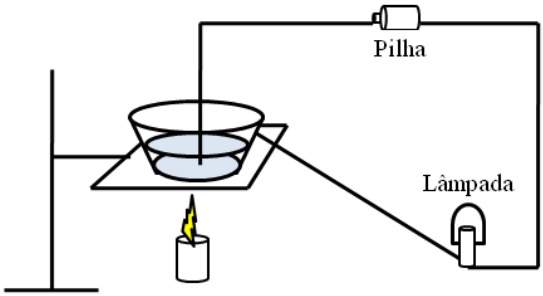

Figura 1.47: Calefação.

Misture um pouco de ácido na água, de modo a torná-la condutora de eletricidade e despeje a solução no recipiente metálico, quando este já estiver

numa temperatura bem superior ao ponto de ebulição da água. Segure a extremidade do fio dentro da solução, mas sem encostar no recipiente, e observe que a lâmpada não acende.

Se o recipiente for resfriado, note que em uma determinada temperatura começa a passar corrente elétrica pelo circuito, devido ao acendimento da lâmpada. A partir desse momento passa a ocorrer uma vaporização mais intensa da água.

Análise e Explicação

Inicialmente a solução de água e ácido não está em contato direto com o recipiente, devido à existência do processo de calefação. A calefação ocorre quando um líquido é posto em contato com um sólido que está numa temperatura superior ao ponto de ebulição do líquido.

Quando despejou-se a solução no recipiente, a temperatura das superfícies das gotas que entraram em contato com o metal era bastante elevada, de modo que o vapor aí formado tem tensão suficiente para sustentar o líquido. Esse vapor comporta-se como uma camada que impede o contato direto do metal com o líquido. Dessa forma, estando o líquido separado do recipiente quente, ele somente poderá receber calor por irradiação. No entanto, os líquidos não se aquecem muito por irradiação, o que faz com que a solução de água e ácido fique numa temperatura inferior ao seu ponto de ebulição. Durante o processo pode ocorrer a formação de pequenos jatos no líquido. Isso deve-se a formação irregular das camadas de vapor que sustentam o líquido.

O fenômeno da calefação explica um truque muito interessante feito por alguns mágicos. Estes conseguem lamber um ferro quente ou colocar por um instante o dedo ou a mão em chumbo líquido (lembrando que o chumbo mantém-se em estado líquido em temperaturas acima de cerca de $330°C$), sem se queimar. Isso é realmente incrível, mas tem uma explicação científica. Para fazer isso ele deve umedecer bem a mão em água ou álcool (a língua já está umedecida). O contato da língua ou da mão com o líquido superaquecido provoca a calefação das moléculas de água das suas superfícies, gerando uma barreira que impede o contato direto entre ambos.

1.64 Pressão e Ponto de Ebulição da Água

Objetivo

Verificar a influência da pressão atmosférica no ponto de ebulição da água.

Materiais Utilizados

1 termômetro, água, 1 recipiente, 1 bico de Bunsen (ou 1 ebulidor elétrico).

Montagem e Procedimento

Coloque água no recipiente e aquece-a até ferver. Meça a temperatura do seu ponto de ebulição. Se você estiver numa região cuja altitude está acima do nível do mar, a temperatura será menor que $100°C$.

Análise e Explicação

Fornecendo energia a um líquido, as moléculas aumentam a sua energia cinética e tendem a se afastar cada vez mais umas das outras. Obtendo uma certa quantidade de energia, o líquido vai se transformando em vapor.

A pressão exercida sobre uma substância influencia o processo de ebulição. Se a pressão sobre o líquido for aumentada, por exemplo, as moléculas passam a ter maior dificuldade para deixar a superfície do líquido. Isso faz com que aumente o ponto de ebulição. Diminuindo a pressão sobre o líquido, ocorre o abaixamento do ponto de ebulição.

O diagrama $p \times T$ na Fig.(1.48) representa a curva de ebulição, mostrando a dependência entre a temperatura (T) de ebulição e a pressão (p).

A água pura, ao nível do mar, entra em ebulição em $100°C$. Num local de maior altitude, a pressão atmosférica é menor, o que faz com que a água ferva numa temperatura menor que $100°C$.

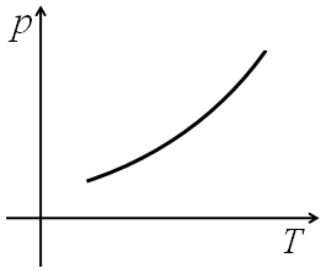

Figura 1.48: Diagrama $p \times T$ representando a curva de ebulição.

1.65 Fervendo Água Sob Pressão 1

Objetivo

Ferver água numa temperatura menor que o seu ponto de ebulição no local.

Materiais Utilizados

1 béquer (ou outro recipiente), 1 fogareiro (ou ebulidor), 1 seringa descartável (sem agulha), água.

Montagem e Procedimento

Coloque uma pequena quantidade de água para aquecer. Quando ela estiver fervendo, retire um pouco de água com a seringa (pouco menos da metade). A seguir feche a entrada da seringa com o dedo e puxe fortemente o êmbolo da mesma. Perceba que a água volta novamente à ferver (Fig.1.49).

Análise e Explicação

A temperatura de ebulição de um líquido depende da pressão à qual ele está submetido. Quanto maior a pressão (p), maior é a temperatura (T) de ebulição, e vice-versa.

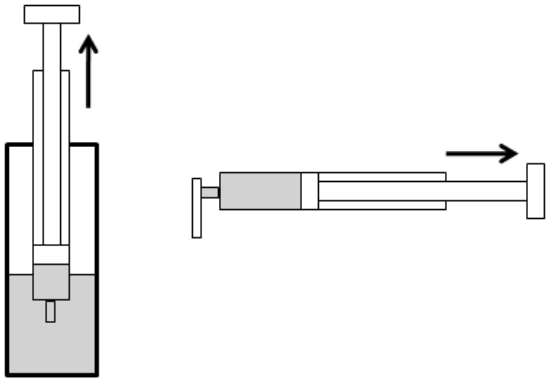

Figura 1.49: Fervendo a água na seringa.

No caso do experimento, quando a água entrou na seringa, ela já estava com uma temperatura um pouco menor que a temperatura de ebulição, pois perdeu um pouco de calor para a própria seringa, para o ambiente, etc. Quando puxa-se o êmbolo da seringa, a pressão interna é reduzida, diminuindo a temperatura de ebulição. Dependendo da temperatura em que a água se encontra (no caso do experimento, bem próxima da temperatura de ebulição), ela começa a ferver na seringa.

Na Fig.(1.50) tem-se o diagrama de estados físicos da água, mostrando os processos ocorridos nesse experimento.

No aquecimento a água vai da posição 1 para a posição 2, sob pressão constante. Ao pegar a água com a seringa a temperatura da água cai um pouso, passando da posição 2 para a 3. Diminuindo a pressão dentro da seringa, faz-se a água voltar a ferver, e ela passa da posição 3 para a 4.

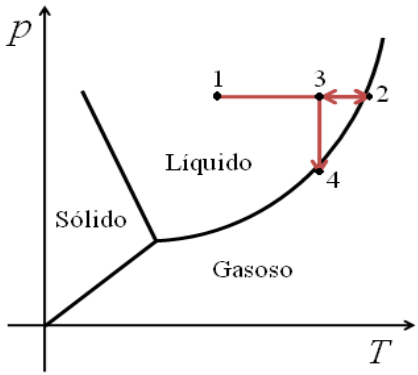

Figura 1.50: Diagrama de fases da água.

1.66 Fervendo Água Sob Pressão 2

Objetivo

Ferver água numa temperatura menor que o seu ponto de ebulição no local.

Materiais Utilizados

Água, 1 balão de vidro, 2 termômetros, 1 rolha, gelo, 1 lamparina.

Montagem e Procedimento

Coloque água dentro do balão de vidro, insira dentro dele o termômetro e aqueça o conjunto na chama da lamparina até a água entrar em ebulição. Veja qual a temperatura que o termômetro registra.

Em seguida apague a chama da lamparina, feche o balão de vidro com a rolha, a qual possui o outro termômetro preso no seu interior. Esfregue uma pedra de gelo ao redor do balão e perceba que a água volta a ferver, mas agora numa temperatura menor.

Análise e Explicação

O gelo em contato com o vidro faz diminuir a temperatura do vapor de água no interior do balão, diminuindo a pressão do gás sobre o líquido. Estando sob menor pressão, a água entra em ebulição numa temperatura menor.

1.67 Panela de Pressão

Objetivo

Verificar porque uma panela de pressão cozinha os alimentos mais rapidamente.

Materiais Utilizados

1 panela comum, 1 panela de pressão, 1 fogão à gás.

Montagem e Procedimento

Coloque um mesmo alimento (numa mesma quantidade) para cozinhar na panela comum e na panela de pressão. Veja em qual das duas o alimento cozinha mais rapidamente. Seria interessante aqui fazer uma visita à uma cozinha e conversar com profissionais que atuam nessa área.

Análise e Explicação

Experimentalmente constata-se que a panela de pressão cozinha os alimentos mais rapidamente que uma panela comum. Um modelo de panela de pressão foi desenvolvida em 1679 pelo físico francês Denis Papim. Ele construiu uma panela de ferro fundido provido de uma tampa que a vedava hermeticamente, com uma válvula de escape de vapor que a impedia de explodir. Com isso ele verificou que o tempo de cozimento dos alimentos era menor. Quanto maior a temperatura, menor é o tempo de cozimento dos alimentos.

No interior de uma panela de pressão a pressão interna de vapor atinge valores de cerca de $2atm$ e a água entra em ebulição em $120°C$. Por medidas de segurança, as panelas de pressão possuem 2 válvulas: uma de contrapeso, que se abre quando a pressão no interior da panela se torna excessiva, aliviando a pressão interna; e uma outra adicional (geralmente de cor vermelha), que salta da panela no caso em que a válvula de contrapeso não venha a funcionar.

1.68 Atrito e Calor

Objetivo

Observar uma transformação de energia mecânica em energia térmica através do atrito.

Materiais Utilizados

1 lixa, 1 pedaço de madeira.

Montagem e Procedimento

Atrite 2 objetos e observe o que ocorre com suas temperaturas (através do tato). Como exemplo sugere-se esfregar uma lixa sobre um pedaço de madeira. Neste caso pode-se verificar que ocorre um aumento de temperatura na superfície da lixa e da madeira onde foi lixada.

Uma maneira muito mais simples de se realizar esse experimento é esfregar as suas mãos, uma contra a outra, e observar que elas se aquecem. Porque isso ocorre? Donde vem esse calor?

Análise e Explicação

Quando dois corpos são postos em contato e movimentados um em relação ao outro, o atrito entre suas superfícies faz com que a energia mecânica utilizada pelos corpos para se movimentarem seja transformada em energia térmica. O aquecimento surge devido ao rompimento das ligações químicas nas regiões de contato entre as duas superfícies dos objetos, causado pela fricção destes.

O atrito surge devido a rugosidade entre duas superfícies em contato, o que permite a troca de forças em uma direção tangencial à região de contato. O trabalho realizado para mover uma superfície contra a outra é transformado em outras formas de energia, entre elas o calor.

1.69 Gelo Suspenso por um Palito

Objetivo

Suspender uma pedra de gelo com um palito grudado na sua parte superior.

Materiais Utilizados

1 pedra de gelo, 1 palito (de fósforo ou de dente), sal de cozinha.

Montagem e Procedimento

Coloque o palito sobre o gelo e jogue o sal em cima. Observe que o palito gruda no gelo (ou o gelo gruda no palito), e você consegue levantar a pedra de gelo pelo palito.

Análise e Explicação

O palito gruda no gelo por causa do sal. Ao ser jogado o sal parte do gelo derrete deixando uma porção d'água em volta do palito. Como essa água continua em contato com o gelo, ela congela novamente, cobrindo o palito com uma leve camada e, assim, prende o palito.

1.70 Efeito Tyndall

Objetivo

Verificar o efeito Tyndall.

Materiais Utilizados

1 bloco de gelo, 1 fio metálico fino, 2 massas.

Montagem e Procedimento

Pendure o fio com as massas nas pontas, sobre um bloco de gelo, como representado na Fig.(1.51). Observe que, com o decorrer do tempo o fio vai penetrando no gelo e atravessa-o, sem que o bloco de gelo se rompa.

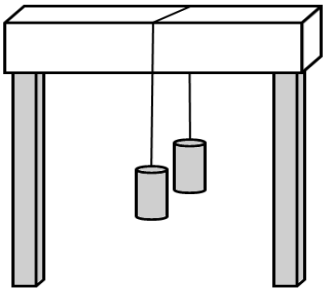

Figura 1.51: Efeito Tyndall.

Análise e Explicação

O efeito Tyndall ou regelo foi descoberto inicialmente por Faraday e investigado posteriormente pelo físico inglês John Tyndall. A pressão exercida pelo fio abaixa a temperatura de congelamento do gelo, que se liquefaz, permitindo a passagem do fio por ele. Após a passagem do fio a água formada volta a estar submetida a pressão anterior e retorna ao estado sólido (regelo). Dessa forma, o fio atravessa totalmente o bloco de gelo sem que este se rompa.

Observe o diagrama de fases da água na Fig.(1.52). Através do aumento de pressão, indicado pela seta, a água passa do estado sólido para o líquido, sem variar a temperatura.

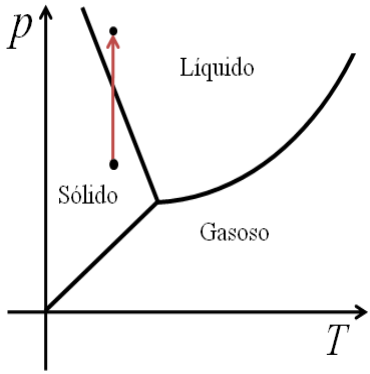

Figura 1.52: Diagrama de fases da água.

Esse mesmo efeito ocorre nas pistas de patinação no gelo. Ao deslizar, as lâminas dos patins exercem uma pressão que provoca a fusão do gelo, facilitando o deslizamento. Assim que o patinador passa, a água volta a se solidificar, pois a pressão assume o seu valor normal.

Um dos motivos para a ocorrência do deslizamento de neve acumulada nas montanhas é o derretimento do gelo. O peso da neve aumenta a pressão na sua base, provocando a fusão da massa de gelo.

1.71 Fervendo o Leite e a Água

Objetivo

Compara o fervimento do leite e da água.

Materiais Utilizados

2 béqueres, água, leite, 1 fonte de aquecimento.

Montagem e Procedimento

Coloque nos 2 béqueres iguais quantidades de água e leite, cada qual no seu recipiente, e os faça ferver. Observe que o nível do leite sobe consideravelmente, possivelmente transbordando o recipiente, enquanto a água não. Mas por que há essa diferença de comportamento, mesmo sabendo que o leite é composto em quase 90% por água?

Análise e Explicação

A temperatura de ebulição da água é inferior a temperatura de ebulição dos demais componentes do leite, como a lactose e a gordura. À medida que a temperatura do leite aproxima-se da temperatura de ebulição da água, inicia-se o processo de vaporização desta, formando bolhas que migram do fundo para a superfície.

Na superfície do leite forma-se uma camada de gordura e proteínas muito resistente e, não conseguindo ferver essa película, as bolhas forçam para cima toda a camada superficial do líquido, originando a espuma que se derrama. Esse processo não ocorre com a água, pois a bolhas de vapor atravessam com facilidade a superfície do líquido.

1.72 Acendendo uma Vela à Distância

Objetivo

Acender uma vela sem encostar a chama do fósforo no seu pavio.

Materiais Utilizados

1 vela, 1 copo, fósforo.

Montagem e Procedimento

Pegue uma vela pequena e deixe-a acesa por alguns segundos. Em seguida apague a vela de maneira suave, colocando um copo sobre ela, e observe a fumaça branca que emana do pavio. Rapidamente acenda um palito de fósforo[17] e coloque sua chama nessa fumaça branca, a uma distância entre $5cm$ e $10cm$ do pavio, e observe que a vela volta a acender.

Análise e Explicação

O combustível da vela é a parafina, um tipo de hidrocarboneto. Durante a queima a parafina evapora e resfria a extremidade superior do pavio[18]. O pavio funciona como um suporte de combustão para a queima da parafina.

A fumaça branca que é visualizada após o apagamento da chama da vela é a parafina condensada. Quando a chama do palito de fósforo é colocada nessa região a parafina entra em combustão, servindo de ponte de comunicação com o pavio da vela, o qual rapidamente acaba acendendo.

[17] Este processo deve ser rápido. Ao apagar a vela o palito de fósforo já deve estar aceso.

[18] Por isso ele apresenta uma menor temperatura nessa região.

1.73 Canhão de Latas

Objetivo

Demonstrar a conversão da energia química em calor e em energia mecânica.

Materiais Utilizados

4 latas de óleo de cozinha vazias, 1 prego, 1 martelo (ou algo para bater), 1 caixa de fósforo, 1 cortador de lata (pode ser uma serrinha de cortar ferro), papel, 1 vareta, fita adesiva.

Montagem e Procedimento

Retire a tampa e o fundo de 3 latas com o auxilio do cortador de lata ou a serrinha de cortar ferro. Na outra lata (a qual chamaremos de lata 1) faça um orifício com o prego na lateral inferior e um outro orifício maior (ou quadrado) na tampa, mantendo-se intacto o seu fundo. Após isso, com o auxílio da fita adesiva, una as latas, como mostra a Fig.(1.53).

Mantendo o arranjo, que de agora em diante será chamado canhão, na vertical, pingue algumas gotas de álcool no seu interior. Tampe a boca do canhão com a mão e coloque o dedo no orifício lateral da lata 1, agitando-o em seguida, favorecendo a evaporação do álcool e sua mistura com o ar no interior do canhão.

Rapidamente segure firmemente o canhão, apontando-o numa direção obliqua (ou a direção que achar melhor) ou apóie-o verticalmente no chão, e acenda um palito de fósforo e coloque-o no orifício da lata 1. A combustão do álcool provocará um estrondo.

Pode-se também, antes de acender o fósforo, colocar uma bola de papel amassada no interior do canhão, de modo que ela fique levemente prensada dentro do cilindro. Com o auxílio da vareta, faça-a descer até a tampa da lata 1. A combustão do álcool, além de provocar o estrondo, lançará para fora a bola de papel.

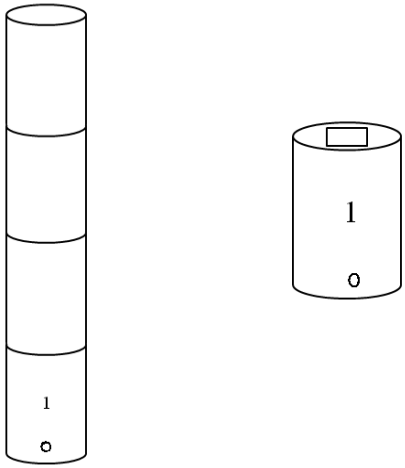

Figura 1.53: Canhão de latas.

Análise e Explicação

A combustão do álcool, que é descrita pela equação:

$$C_2H_6O + 3O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 3H_2O + \text{ Calor}$$

ocasiona uma rápida expansão do ar, o qual produz uma onda sonora e ejeta a bola de papel para fora do canhão. Esta situação é um caso onde ocorre a conversão da energia química em energia mecânica, na forma de uma onda sonora, e energia cinética (arremesso da bola de papel), e em calor, que provoca o aquecimento do ar e do canhão.

1.74 Aeolípile

Objetivo

Construir uma máquina térmica primitiva, mais precisamente o aeolípile.

Materiais Utilizados

1 lata de óleo de cozinha (vazia), 2 tubos de cobre (ou qualquer tubo metálico), equipamento de solda, 1 lamparina (ou 1 bico de Bunsen), 1 barbante, 1 gancho, 1 suporte, água.

Montagem e Procedimento

Faça 2 orifícios diametralmente opostos na lateral superior da lata, colocando os 2 tubos de cobre orientados em sentidos opostos, de modo que fiquem bem vedados. No centro da tampa da lata solde um gancho, de modo que a lata fique suspensa pelo barbante e possa girar livremente. Coloque um pouco de água dentro da lata (fazendo-a entrar ou introduzindo-a pelos tubinhos). Acenda a lamparina sob a lata de modo à aquecê-la. Observe que, quando a água entra em ebulição e o vapor começa a sair pelos tubos, a lata começa a girar.

Na Fig.(1.54-a) temos um esquema da montagem dos tubos na lata, visto de cima, e na Fig.(1.54-b) o aeolípile posto à funcionar.

Análise e Explicação

A reação provocada pelos vapores que saem pelos tubos origina um torque, fazendo a lata girar. Este equipamento aqui construído é o aeolípile, a mais primitiva máquina térmica que se tem registro, construído por Heron de Alexandria no século II a.C. É uma máquina térmica das mais simples possíveis, capaz de transformar a energia térmica em energia mecânica.

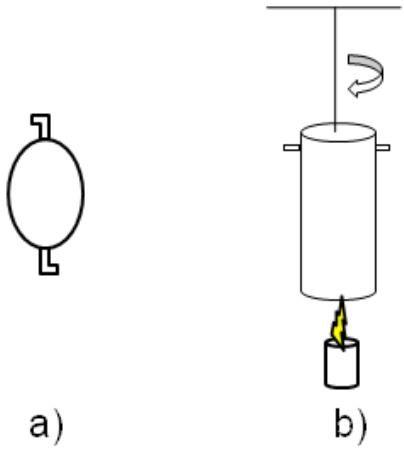

Figura 1.54: a- Posição dos tubos na lata; b- Aeolípile posto em funcionamento.

1.75 Máquina a Vapor

Objetivos

Construir uma máquina a vapor e demonstrar a conversão da energia térmica em energia mecânica.

Materiais Utilizados

1 lata de óleo, 1 tubo de cobre, água, lamparinas, 1 suporte, 1 roda com pás (feita de lata).

Montagem e Procedimento

Monte o experimento de acordo com o esquema da Fig.(1.55). Conecte o tubo na lata e despeje água dentro da lata. Com as lamparinas aqueça a água da lata, e observe que o vapor gerado movimenta a roda com pás (turbina).

Como substituição às lamparinas pode-se usar um recipiente metálico, nele colocar pedaços de giz e sobre eles derramar álcool. O giz é um material

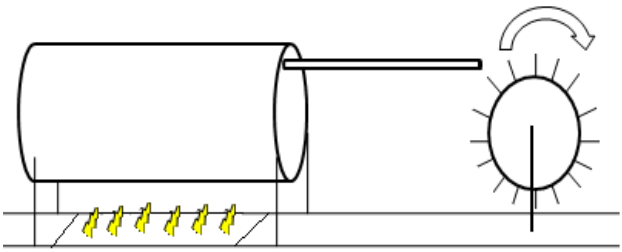

Figura 1.55: Máquina a vapor.

poroso e o álcool derramado sobre ele é sugado pelos seus poros e depois é liberado aos poucos durante a combustão.

Análise e Explicação

Todas as máquinas térmicas funcionam baseadas no fato de que o calor é uma forma de energia e pode ser utilizada para produzir movimento. Neste experimento o vapor sai da caldeira (lata) com uma certa pressão, o que provoca a rotação na turbina.

A expansão do vapor causa diminuição da temperatura e da energia interna. Essa energia perdida pelo gás aparece na forma de energia mecânica, que acaba girando a turbina.

1.76 Barco a Vapor

Objetivo

Construir de explicar o funcionamento de um barquinho a vapor.

Materiais Utilizados

1 frasco plástico de desodorante (ou algo similar), 1 tubo fino de cobre, 1 lamparina ou 1 pedaço de vela, 1 seringa, fósforo, local com água (um pequeno lago, por exemplo).

Montagem e Procedimento

O esquema do barco a vapor está representado na Fig.(1.56). Inicialmente corte o frasco de desodorante longitudinalmente pelo meio. Pegue o tubo de cobre (usado em geladeiras, freezers, etc) e faça 2 espiras na região central, enrolando-o num cilindro de tamanho suficiente, se necessário. A parte das espiras deve ficar um pouco mais elevada do que o restante do tubo, pois ela vai ficar sobre a chama da lamparina. As extremidades do tubo serão introduzidas em 2 furos feitos na traseira do barco, e deve ter uns $2cm$ ou $3cm$ de comprimento cada. Geralmente os tubos ficam bem presos no plástico do barco, mas, se necessário, pode-se passar cola ao seu redor para evitar entrada de água.

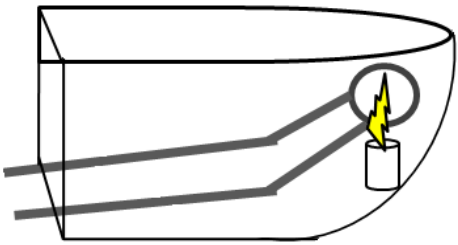

Figura 1.56: Barco a vapor.

Para colocar o barco em movimento basta encher o tubo com água, que pode ser feito utilizando uma seringa. Após isso coloque-o na água e acenda a vela. Quando as espiras de cobre estiverem suficientemente quente para ferver água dentro dela, o barco dará um tranco para frente e depois se movimentará vagarosamente. O barco lançará jatos de água para trás, fazendo com que ele se movimente para frente.

Análise e Explicação

Quando as espiras, que funcionam como uma pequena caldeira, são aquecidas pela chama da lamparina, o vapor formado obriga a água a sair pelos tubos e o barco move-se para frente. Quando se consome a água que estava na caldeira, o barco deveria parar, mas o que acontece é que os tubos aspiram mais água para dentro da caldeira e o processo se repete. Ele para somente com a extinção da chama da lamparina.

Quando a água e o vapor saem da caldeira, parte do vapor restante se condensa e se contrai nos tubos, os quais estão mais frios. Essa contração diminui a pressão, o que faz com que a água fria seja aspirada para dentro dos tubos, recomeçando o ciclo. O barco vai para a frente porque a água é empurrada para trás. No entanto, ela entra no tubo por todos os lados, fazendo com que haja uma força resultante.

1.77 Comportamento de um Tira de Borracha

Objetivo

Verificar a temperatura de uma tira de borracha ao ser ao ser esticada e/ou contraida.

Materiais Utilizados

1 balão de borracha.

Montagem e Procedimento

Segure o balão pelos seus extremos de modo a formar uma tira de borracha. Estique a tira e coloque-a em contato com a testa, mantendo-a esticada. Perceba que ela está quente.

Afaste a tira da testa e mantenha-a esticada por cerca de meio minuto. Em seguida deixe-a voltar ao seu tamanho original e novamente segure-a junto à testa. Constate que agora ela está fria. Por que ocorre esta diferença de temperatura?

Análise e Explicação

O balão se aquece quando você o estica e se resfria quando você o deixa relaxado. Na Fig.(1.57) tem-se um gráfico da temperatura (T) em função do tempo (t). No estiramento a energia proveniente dos seus músculos para esticar a borracha é transformada em calor, aumentando a temperatura da borracha (I). No tempo em que o balão fica esticado o calor é transferido para o ambiente (II) e, quando a borracha é relaxada ela retira calor do ambiente, dando a sensação de mais frio (III).

Diferentemente da maioria dos materiais, quando a borracha é aquecida, devido a grande quantidade de moléculas encadeadas, que se atraem, o seu comprimento diminui. Isso ocorre porque as extremidades de cada cadeia estão mais firmemente presas por ligações químicas às outras cadeias do que a região central e ela tem que puxar suas partes vizinhas para mais perto. A tira de borracha acaba encolhendo.

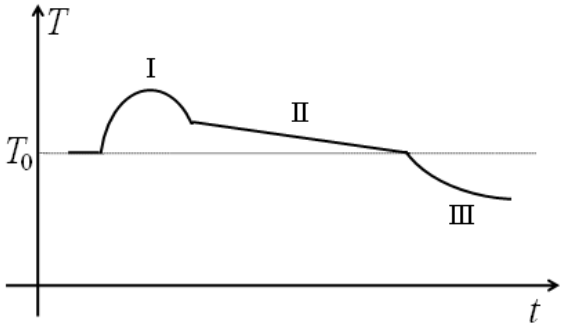

Figura 1.57: Temperatura da borracha do balão.

1.78 Expansão Adiabática

Objetivo

Verificar o comportamento de um gás durante uma expansão adiabática.

Materiais Utilizados

Apenas você mesmo.

Montagem e Procedimento

Coloque uma de suas mãos próxima de sua boca e, com esta aberta, sopre ar sobre a mão. Agora realize o mesmo procedimento, mas soprando ar com a boca quase fechada. Por que na primeira situação o ar está mais quente do que na segunda?

Análise e Explicação

A diferença de temperatura ocorre porque, na segunda situação o ar sofre uma expansão adiabática ao passar pela boca quase fechada, o que leva a uma queda na sua temperatura.

De acordo com a primeira lei da termodinâmica tem-se que a variação da energia interna (ΔU) de um sistema é dada pela diferença entre a quantidade de calor recebido (Q) e o trabalho realizado (W):

$$\Delta U = Q - W \tag{1.22}$$

Quando um gás sofre uma expansão ou compressão rápida, diz-se que ocorre uma transformação adiabática, ou seja, não há troca de calor entre o gás e o meio externo. Sendo $Q = 0$ e que o trabalho realizado na expansão é positivo[19] ($W > 0$), da Eq.(1.22) vem que $\Delta U = -W$, ou:

$$W = -\Delta U$$

o que mostra que a energia interna do sistema diminuiu. Uma diminuição na energia interna do gás implica na redução da sua temperatura

[19]Sob pressão (p) constante o trabalho exercido pelo gás é dado por $W = p(V - V_0)$. Sendo $V > V_0$ tem-se que $W > 0$.

1.79 Compressão Adiabática

Objetivo

Verificar o comportamento de um gás numa compressão adiabática.

Materiais Utilizados

1 bomba manual de encher bola (ou pneu).

Montagem e Procedimento

Tampe a saída de ar da bomba com um dos dedos e comprima rapidamente o pistão (êmbolo). Perceba a elevação da temperatura do ar que foi comprimido no interior da bomba[20].

Análise e Explicação

Nesse processo ocorre uma compressão adiabática. Sendo $Q = 0$, a Eq.(1.22) fica:

$$\Delta U = -W \tag{1.23}$$

Se o gás é comprimido, o trabalho é realizado sobre o gás e W é negativo. Sendo que $W < 0$, a partir de (1.23) conclui-se que a energia interna do gás aumenta ($\Delta U > 0$), de modo que a sua temperatura T também aumenta.

[20]Esse aumento de temperatura pode ser verificado no aquecimento do cilindro da bomba após algumas bombeadas.

1.80 Segunda Lei da Termodinâmica

Objetivo

Verificar experimentalmente a segunda lei da termodinâmica.

Materiais Utilizados

2 corpos com diferentes temperaturas, 2 termômetros.

Montagem e Procedimento

Coloque próximo os 2 corpos à diferentes temperaturas e acompanhe como elas se comportam.

Análise e Explicação

A segunda lei da termodinâmica enuncia que o calor não flui de um corpo de temperatura mais baixa para outro de temperatura mais alta. Em outras palavras, esta lei afirma que é impossível converter integralmente calor em outra forma de energia.

Poderiamos pensar que uma geladeira, por exemplo, estaria violando a segunda lei da termodinâmica, pois ela retira calor da fonte fria (seu interior) e transmite para a fonte quente (ambiente externo). Nesse caso o calor realmente está migrando de uma região de temperatura mais baixa para uma de temperatura mais alta, mas não de maneira espontânea, e sim, à custa de trabalho de um motor elétrico e de um compressor.

1.81 Entropia

Objetivo

Estudar o conceito de entropia.

Materiais Utilizados

2 caixas de fósforo (vazias), grãos de feijão (pretos e brancos, ou coloridos, ou algo semelhante), 1 tesoura, fita adesiva.

Montagem e Procedimento

Una as duas partes internas das caixas de fósforo, prendendo-as com fita. Com a tesoura, faça uma abertura na região de contato para que elas possam se comunicar.

Coloque certo número de feijões pretos apenas num lado, como representado na Fig.(1.58-a). Em seguida coloque as partes externas das caixinhas sobre as partes internas, de modo a fechá-las e as agite horizontalmente. Após a agitação você verificará que os feijões se espalham (Fig.1.58-b).

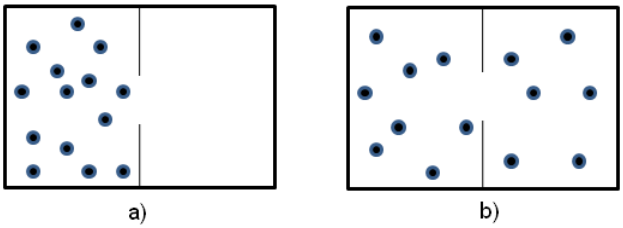

Figura 1.58: Caixinhas com feijões: a- Em apenas 1 lado; b- Nos 2 lados.

O experimento pode ser feito de maneira semelhante colocando feijões de 2 cores diferentes, sendo feijões de 1 cor em cada lado da caixinha. Você verificará que após a agitação os feijões acabam se misturando.

Análise e Explicação

A grandeza denominada entropia foi definida pelo físico alemão Rudolf Clausius, como uma maneira de melhor compreender a ocorrência dos fenômenos naturais. O conceito de entropia geralmente é associado ao grau de desordem do sistema, o qual pode ser relacionado com a organização espacial e energética das partículas que o compõem. Quanto maior a entropia, maior tende a ser a desordem do sistema.

Uma das implicações da segunda lei da termodinâmica é que, para um sistema termodinâmico isolado que evolui espontaneamente, a entropia total sempre se mantém constante ou aumenta com o tempo. Analisando diversos processos naturais constata-se que eles sempre ocorrem no sentido de haver passagem espontânea de um estado ordenado para um estado mais desordenado das moléculas.

Imagine um evento em que uma xícara de café cai no chão, quebrando a xícara e espalhando o café. O processo inverso, do agrupamento do café e da recomposição da xícara, voltando íntegra sobre a mesa, de maneira espontânea, você nunca observará. Da mesma forma que é muito pouco provável que, no experimento das caixinhas, os feijões coloridos, após serem misturados, novamente se separem em duas cores, ficando uma em cada lado da caixa, devido à agitação do conjunto.

Todos os processos naturais ocorrem em apenas um sentido. Por meios naturais tais processos nunca ocorrerão em sentidos contrários. O que controla o sentido dos processos irreversíveis é a propriedade denominada entropia (S). O que importa realmente não é a entropia, mas a variação da entropia (ΔS).

Se um processo em um sistema fechado ocorre irreversivelmente, o principio da entropia estabelece que $\Delta S > 0$. Num processo isotérmico, onde a transferência de calor ocorre à temperatura constante T, ΔS é definida como:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Quando ocorrem mudanças em um sistema fechado, sua entropia nunca diminui. Ela cresce em processos irreversíveis ou permanece constante em processos reversíveis. Nunca foi encontrado exceções à essa lei. No universo

há uma tendência natural de transformação das formas de energia consideradas organizadas (energia química, elétrica, etc.) em formas desorganizadas (calor). Essa transformação acontece integralmente e a possibilidade da ocorrência do processo inverso é quase nula, pois a transformação de calor em outra forma de energia é sempre incompleta.

Capítulo 2

ONDULATÓRIA

2.1 Oscilador Harmônico Simples

Objetivo

Estudar o movimento harmônico simples (MHS).

Materiais Utilizados

1 suporte, 1 mola de caderno, alguns corpos pequenos (densos, de diferentes massas).

Montagem e Procedimento

Prenda a mola no suporte e nela pendure um corpo, como representado na Fig.(2.1). Desloque o corpo verticalmente para baixo e solte-o, verificando que o mesmo passará a oscilar. Marque o tempo Δt necessário para o mesmo efetuar n oscilações e obtenha a frequência f (número de oscilações efetuadas a cada segundo) através da relação:

$$f = \frac{n}{\Delta t}$$

Repita o experimento variando a massa do corpo suspenso (substituindo por outro) e compare os resultados com a expressão da frequência de oscila-

Figura 2.1: Corpo suspenso por uma mola.

ção de um oscilador harmônico simples:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

onde m é a massa do corpo suspenso e k a constante elástica da mola.

Análise e Explicação

O Movimento harmônico simples (MHS) é um movimento oscilatório (ou vibratório) em que algo realiza sucessivas oscilações, como um pêndulo de relógio, as cordas de um violão, a membrana de um tambor, entre outros.

As equações que descrevem a elongação x, a velocidade v e a aceleração escalar a de um objeto executando um movimento harmônico simples (MHS) são:

$$x = Acos(\omega t + \phi) \tag{2.1}$$

$$v = -\omega Asen(\omega t + \phi) \tag{2.2}$$

$$a = -\omega^2 Acos(\omega t + \phi) \tag{2.3}$$

onde A é a amplitude, ω a velocidade angular e ϕ a fase inicial.

Relacionando (2.3) e (2.1) pode-se escrever a como:

$$\alpha = -\omega^2 x \tag{2.4}$$

Quando está afastada de sua posição de equilíbrio a mola exerce sobre o bloco uma força dada pela lei de Hook:

$$F = -kx \tag{2.5}$$

Relacionando a segunda lei de Newton $F = ma$ com a Eq.(2.4):

$$F = -m\omega^2 x \tag{2.6}$$

Igualando (2.5) e (2.6) tem-se que $k = m\omega^2$, donde vem:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.7}$$

A velocidade angular ω relaciona-se com o período T por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{2.8}$$

Igualando (2.7) e (2.8) tem-se que o período de oscilação do pêndulo (tempo que ele leva para efetuar uma oscilação) é:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{2.9}$$

Sendo que o período é o inverso da frequência:

$$f = \frac{1}{T}$$

a partir de (2.9) vem que:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.10}$$

Sendo k uma constante, a qual depende da mola, a partir de (2.10) percebe-se que, aumentando-se a massa m suspensa, a frequência de oscilação diminui, ou o período de oscilação aumenta.

2.2 Pêndulo Simples

Objetivo

Analisar o movimento de um pêndulo simples.

Materiais Utilizados

1 pote rígido pequeno, alguns parafusos pequenos, 1 fio fino (linha de costura), 1 cronômetro, 1 transferidor, 1 trena (ou 1 régua), 1 imã.

Montagem e Procedimento

Construa um pêndulo, prendendo o pote no fio e o fio num suporte firme, de modo que ele possa oscilar livremente. Dentro do pote introduza alguns parafusos e coloque o pêndulo para oscilar em ângulos pequenos (menores que $10°$), o qual pode ser medido com o auxílio de um transferidor.

Com o cronômetro marque o tempo que o pêndulo demora para efetuar umas 5 oscilações[1] Varie a massa suspensa no pêndulo (número de parafusos no interior do pote), o comprimento do fio e o ângulo de oscilação (mas mantendo este menor que uns $10°$) e veja como varia o tempo para efetuar o mesmo número de oscilações.

Disponha o imã sob o pote, de modo que ele não fique muito distante do fundo do mesmo. Coloque o pêndulo para oscilar e perceba como varia o seu período de oscilação. Neste caso a ação do imã sobre os parafusos do pote faz o papel de um intensificador da aceleração da gravidade local.

Análise e Explicação

O pêndulo simples é um sistema mecânico que exibe movimento periódico ou oscilatório. Ele consiste num pequeno corpo de massa puntiforme m suspenso em um ponto fixo por um fio inextensível (que não estende) e de peso desprezível. Quando afastado de sua posição de equilíbrio e abandonado, o pêndulo se movimenta em um plano vertical sob a ação da gravidade.

[1] Marcando o tempo que o pêndulo leva para efetuar várias oscilações comete-se um erro menor do que marcar diretamente apenas 1 oscilação.

Esse movimento é oscilatório e periódico. Na Fig.(2.2) estão representadas as forças que atuam sobre o corpo suspenso do pêndulo, desprezando a resistência do ar e a massa do fio.

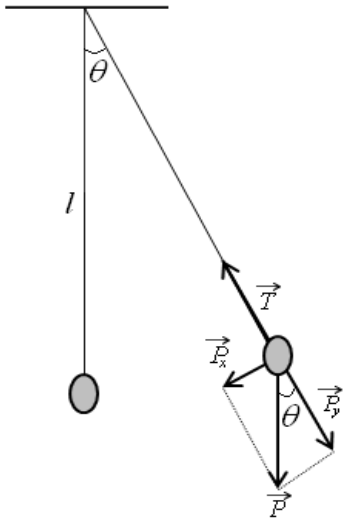

Figura 2.2: Forças atuantes sobre a massa do pêndulo.

As forças que atuam na massa pendular são a tração ($\vec{T}$), exercida pelo fio, e o peso ($\vec{P}$) da massa. O peso pode ser decomposto segundo as direções da reta tangente e da reta normal à trajetória. A componente tangencial do peso ($\vec{P}_x$) é a força restauradora do movimento oscilatório do pêndulo e sua intensidade é dada por:

$$P_x = mgsen\theta \tag{2.11}$$

Se as oscilações ocorrem com ângulos pequenos ($\theta_{max} \leq 10°$), tem-se que $sen\theta \cong \theta$, e o movimento passa a ser harmônico. Com essa aproximação, a Eq.(2.11) pode ser descrita como:

$$P_x = mg\theta \tag{2.12}$$

O ângulo θ é expresso em radianos como sendo $\theta = x/l$, de modo que a

Eq.(2.12) pode ser escrita como:

$$P_x = \frac{mgx}{l} \tag{2.13}$$

Sendo que a intensidade da força restauradora $\vec{P}_x$ é proporcional à elongação x (de acordo com a lei de Hook $F = -kx$), a Eq.(2.13) é escrita como $P_x = kx$, donde vem:

$$k = \frac{mg}{l} \tag{2.14}$$

Como viu-se no Exp.(2.1), o período do MHS é dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{2.15}$$

Levando (2.14) em (2.15) encontra-se que o período de oscilação de um pêndulo simples é:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \tag{2.16}$$

A sua correspondente frequência de oscilação é:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{2.17}$$

Analisando as expressões (2.16) e (2.17) conclui-se que T e f independem da massa pendular e da amplitude de oscilação. Dependem apenas do comprimento do pêndulo (l) e da aceleração da gravidade (g).

2.3 Pêndulo Cônico

Objetivo

Estudar o movimento de um pêndulo cônico.

Materiais Utilizados

1 pêndulo, 1 régua, 1 cronômetro.

Montagem e Procedimento

Com a mão coloque o pêndulo a girar, de modo que seu movimento forme um cone, como representado na Fig.(2.3). Procure manter constante o raio da circunferência e a frequência de rotação.

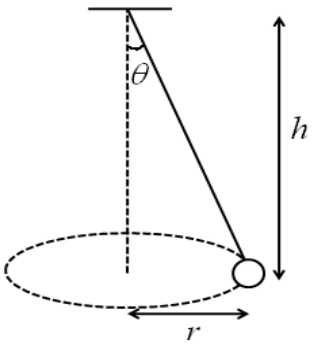

Figura 2.3: Pêndulo cônico.

Peça para um colega medir com a régua a altura h e com o cronômetro a frequência de rotação. Para esta última encontre inicialmente o intervalo de tempo Δt para o pêndulo executar n voltar e depois encontre o período T por $T = \Delta t/n$ e a frequência através de $f = 1/T$.

Compare o valor experimental de f com o valor teórico, o qual depende de h e da aceleração da gravidade g.

Análise e Explicação

Veja o esquema da Fig.(2.4). A força centrípeta $\vec{F}_c$ que permite ao pêndulo descrever a circunferência é a força resultante da tração $\vec{T}$ exercida pelo fio sobre a esfera do pêndulo e do peso do pêndulo $\vec{P}$.

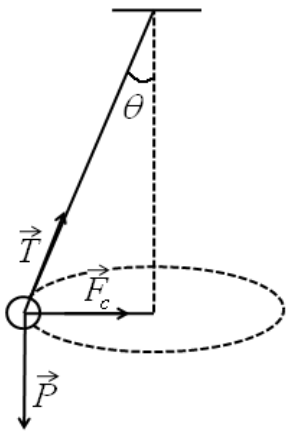

Figura 2.4: Forças atuantes sobre a massa do pêndulo cônico.

De acordo com o triângulo da Fig.(2.4) tem-se $tg\theta = F_c/P$. Sendo $F_c = mv^2/r$ e $P = mg$, vem que:

$$tg\theta = \frac{v^2}{rg} \tag{2.18}$$

onde θ é o ângulo do pêndulo com a vertical, r o raio da circunferência descrita e v o módulo da velocidade linear do pêndulo.

Sendo que no movimento circular $v = 2\pi r f$, a Eq.(2.18) fica:

$$tg\theta = \frac{4\pi^2 r f^2}{g} \tag{2.19}$$

Do triângulo da Fig.(2.3) vem que:

$$tg\theta = \frac{r}{h} \tag{2.20}$$

Igualando (2.19) e (2.20) vem que a frequência do pêndulo cônico é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{h}}$$

Sendo g constante num determinado local, percebe-se que, ao aumentar a frequência f, o valor de h diminui.

2.4 Pêndulo Simples e Aceleração da Gravidade

Objetivo

Determinar o valor da aceleração da gravidade local através do movimento de um pêndulo simples.

Materiais Utilizados

1 pêndulo (de comprimento variável), 1 cronômetro, 1 transferidor e 1 trena (ou 1 régua).

Montagem e Procedimento

Coloque o pêndulo para oscilar em ângulos menores que $10°$, que pode ser medido com o auxilio do transferidor. Faça uma variação da amplitude de oscilação, que é a distância máxima da massa em relação à posição de equilíbrio do pêndulo. Varie o comprimento do pêndulo[2], marcando para cada caso o respectivo período de oscilação com o cronômetro.

Sugere-se medir o tempo gasto Δt, em N oscilações completas, calculando T pela razão $T = \Delta t/N$. Recolha os dados em uma tabela e faça uma análise do experimento.

Análise e Explicação

Como vimos no Exp.(2.2), o período de oscilação de um pendulo simples é dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \tag{2.21}$$

Isolando g na Eq.(2.21), vem que:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \tag{2.22}$$

O experimento do pêndulo simples é de grande importância para se analisar certas propriedades do movimento oscilatório. Durante os três últimos

[2]É importante frisar que o comprimento do pendulo é a medida do fio mais metade da medida da massa suspensa.

séculos ele foi o mais confiável medidor do tempo de que se dispôs, sendo substituído no século XX pelos relógios de oscilações atômicas e eletrônicas.

É também um instrumento conveniente para a medição da aceleração da gravidade (g). Certas informações sobre o subsolo terrestre, como a localização de jazidas de petróleo e minerais, por exemplo, podem ser analisadas a partir do conhecimento das variações locais de g.

Para um pêndulo com $0,64m$ de comprimento foi obtido o conjunto de valores que se encontra na Tab.(2.2). Δt corresponde ao período de 10 oscilações.

Tabela 2.1: Dados de um pêndulo com $0,64m$ de comprimento.

Δt	T
$15,98s$	$1,598s$
$15,97s$	$1,597s$
$15,96s$	$1,596s$
$16,08s$	$1,608s$
$16,00s$	$1,600s$
$15,91s$	$1,591s$
$16,10s$	$1,610s$
$16,09s$	$1,609s$

Daí obtem-se um período médio de $1,601s$. Usando a Eq.(2.22) encontra-se um valor para a aceleração da gravidade de $9,857m/s^2$.

Para um pêndulo com $0,176m$ de comprimento foi obtido os valores que se encontram na Tab.(2.2), donde vem a média de $0,843s$ e um valor para a aceleração da gravidade de $9,77m/s^2$. Fazendo a média dos 2 valores de aceleração encontrados vem que $g = 9,81m/s^2$.

Tabela 2.2: Dados de um pêndulo com $0,176m$ de comprimento.

Δt	T
$8,45s$	$0,845s$
$8,47s$	$0,847s$
$8,50s$	$0,850s$
$8,38s$	$0,838s$
$8,40s$	$0,840s$
$8,42s$	$0,842s$
$8,44s$	$0,844s$
$8,41s$	$0,841s$

2.5 Pêndulo de Foucault

Objetivo

Demonstrar a permanência de oscilação de um pêndulo no mesmo plano (pêndulo de Foucault).

Materiais Utilizados

1 pêndulo, 1 suporte de sustentação (giratório).

Montagem e Procedimento

Monte um suporte de modo que ele possa girar livremente ao redor do eixo vertical. Prenda o pêndulo na haste horizontal do suporte, na mesma linha vertical que passa pelo eixo acoplado na base (o pêndulo não dever sofrer translação durante o giro do suporte) (Fig.2.5).

Coloque o pêndulo a oscilar num determinado plano. Girando o suporte observe que o pêndulo não acompanha o movimento, continuando a oscilar no plano inicial.

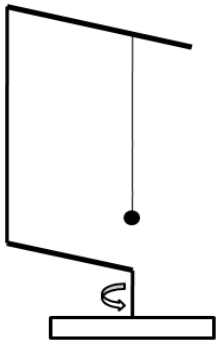

Figura 2.5: Pêndulo de Foucault.

Análise e Explicação

Em 1851 o cientista Foucault realizou um experimento em Paris, França, para demonstrar o movimento de rotação da terra. No experimento montou-se um pêndulo de $67m$ de comprimento e $28kg$ de massa pendular, o qual foi posto a oscilar num determinado plano.

Em um referencial inercial o plano de oscilação de um pêndulo mantém-se fixo no plano vertical pelo ponto de sustentação. No entanto, em relação ao referencial da terra o ponto de oscilação do pêndulo gira em sentido oposto ao do referencial. Com o passar do tempo o pêndulo de Foucault mudou sua direção de oscilação.

2.6 Ondas Transversais e Longitudinais

Objetivo

Diferenciar ondas transversais e ondas longitudinais.

Materiais Utilizados

1 mola grossa de encadernação, 1 massa.

Montagem e Procedimento

Prenda uma extremidade da mola de modo que ela fique na horizontal. Segure-a pela outra extremidade e oscile-a na vertical, de modo a produzir ondas transversais [3], como esquematizado na Fig.(2.6).

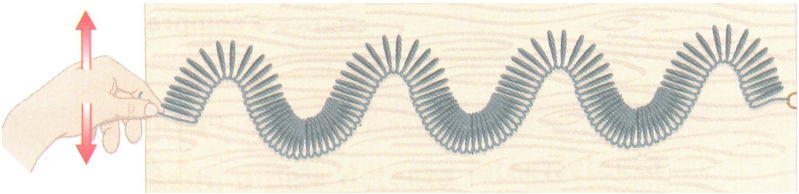

Figura 2.6: Ondas transversais.

Em seguida prenda a massa numa extremidade da mola e suspenda-a verticalmente. Segurando a outra extremidade com a mão movimente o conjunto na vertical, de modo que a mola passe a oscilar, como na Fig.(2.7). Você estará produzindo ondas longitudinais.

Análise e Explicação

Uma onda é chamada de transversal quando as partículas do meio vibram em uma direção perpendicular à direção de propagação da onda. Exemplo de ondas transversais são as ondas eletromagnéticas, onde os campos elétrico e

[3] Neste caso pode-se utilizar também uma corda qualquer, e não necessariamente uma mola.

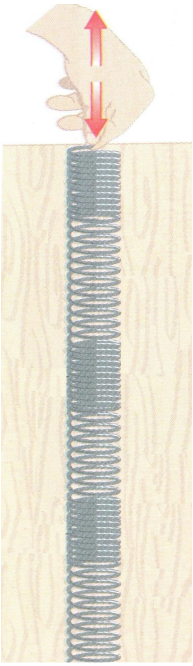

Figura 2.7: Ondas longitudinais.

magnético oscilam perpendicularmente entre si, bem como são perpendiculares a direção de propagação da onda.

Uma onda é classificada como longitudinal quando as partículas do meio vibram na mesma direção em que a onda se propaga. Como exemplo de uma onda longitudinal tem-se as ondas sonoras. Nestas as partículas do meio passam por compressões e rarefações periódicas à medida que a onda se propaga.

O comprimento de onda corresponde á distância entre duas cristas ou dois vales sucessivos, e no caso de uma onda longitudinal corresponde à distância entre duas regiões de compressão ou rarefação sucessivas.

2.7 Ondas Sonoras e Sinais de Luz

Objetivo

Converter ondas sonoras em padrões de sinais de luz.

Materiais Utilizados

1 balão de borracha, 1 espelho plano (pequeno, com cerca de $1cm \times 1cm$), 1 apontador laser, fita adesiva, 1 mesa plana.

Montagem e Procedimento

Encha o balão e prenda o espelho com fita sobre um local conveniente na sua superfície. Fixe também o balão sobre a mesa plana. Incida o feixe de laser sobre o espelho de modo que a luz refletida por ele seja projetada numa parede ou qualquer outro anteparo, como representado na Fig.(2.8).

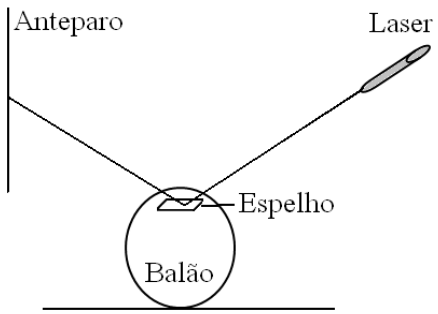

Figura 2.8: Laser incidindo sobre o espelho disposto sobre o balão.

É importante que o apontador laser esteja bem fixado para não oscilar. Observe que qualquer excitação no ambiente próximo à bexiga faz variar a posição do ponto luminoso da luz laser na parede.

Análise e Explicação

As ondas sonoras incidem sobre o balão, fazendo-o vibrar. Essas vibrações mudam a orientação do espelho e, consequentemente, altera o ângulo de incidência e reflexão do feixe de luz. Isso faz com que o feixe mude o local da incidência na parede. Quanto mais afastada estiver a parede, maior serão os deslocamentos notados.

2.8 Ressonância

Objetivo

Verificar o fenômeno da ressonância.

Materiais Utilizados

Pêndulos de diferentes comprimentos, 1 haste metálica.

Montagem e Procedimento

Pendure numa haste metálica vários pêndulos presos com barbantes de comprimentos diferentes. O pêndulo A possui comprimento variável. Ajuste o comprimento de A com o comprimento de um dos outros (designados pelas letras B, C e D) e coloque-o para oscilar. De acordo com a Fig.(2.9), os pêndulos A e D têm mesmo comprimento.

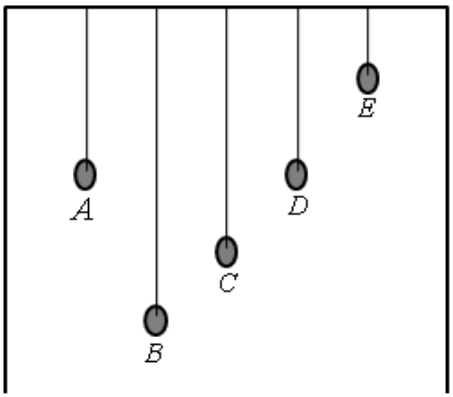

Figura 2.9: Pêndulos acoplados.

Note que todos os pêndulos se movimentam ligeiramente ao redor da posição de equilíbrio, mas o pêndulo D tem sua oscilação aumentada e, com o tempo, passa a oscilar com amplitude praticamente igual à do pêndulo A.

Análise e Explicação

O período de oscilação de um pêndulo depende apenas do seu comprimento (e da gravidade, mas nesse caso ela permanece constante). Tendo o mesmo período, D entra em ressonância com A, passando a oscilar com a mesma amplitude (pode haver uma diferença de fase entre eles).

2.9 Pêndulos Ressonantes

Objetivo

Verificar o fenômeno da ressonância entre 2 pêndulos acoplados.

Materiais Utilizados

1 barbante, 2 suportes, 2 pêndulos de mesmo comprimento.

Montagem e Procedimento

Amarre o barbante entre os 2 suportes e nele pendure os 2 pêndulos. Retire um dos pêndulos de sua posição de equilíbrio, colocando-o em oscilação. Enquanto este pêndulo oscila, o outro pêndulo começa lentamente a balançar, e vai aumentando a sua amplitude de oscilação. Enquanto um pêndulo vai aumentando a amplitude de oscilação, o outro vai diminuindo, até chegar num momento em que um pêndulo para de oscilar e o outro oscila com amplitude máxima. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(2.10).

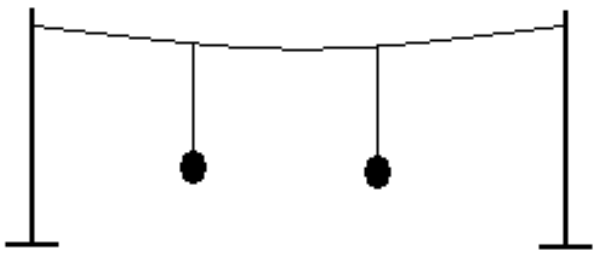

Figura 2.10: Pêndulos suspensos no barbante.

Análise e Explicação

Cada pêndulo tem sua frequência natural ou ressonante de oscilação. Essa frequência depende apenas do comprimento do pêndulo, de modo que o pêndulo mais comprido tem frequência menor.

No experimento realizado, o pêndulo posto inicialmente à oscilar atua como excitador para o segundo pêndulo, que tem mesma frequência natural que o primeiro. O segundo pêndulo oscila fora de fase com o primeiro, mas no decorrer do tempo este vai transferindo sua energia (através do barbante) para ele.

O atrito envolvido no movimento faz com que parte da energia mecânica do sistema seja dissipada, levando os pêndulos ao repouso depois de um certo tempo.

2.10 Anéis Ressonantes

Objetivo

Verificar a vibração de objetos de diferentes tamanhos quando submetidos à diferentes frequências.

Materiais Utilizados

1 pedaço de papelão, 1 pedaço de papel cartolina, fita adesiva, 1 tesoura, 1 grampeador.

Montagem e Procedimento

Corte com a tesoura algumas tiras de cartolinas, com cerca de $2cm$ ou $3cm$ de largura e de diferentes comprimentos. Junte as extremidades das tiras, prendendo-as com a fita adesiva, de modo a formar anéis de diferentes diâmetros. Em seguida fixe os anéis sobre o papelão utilizando o grampeador. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(2.11).

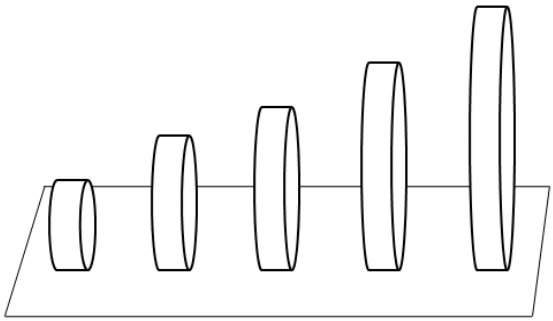

Figura 2.11: Anéis ressonantes.

Inicialmente agite horizontalmente o conjunto, segurando o papelão. Comece de maneira vagarosa e depois vá aumentando a frequência de agitação. Observe que em baixa frequência somente o anel maior oscila. À medida que

a frequência vai aumentando os anéis menores começam a vibrar e os maiores deixam de oscilar. O mesmo comportamento dos anéis é observado se o papelão for agitado verticalmente.

Ao invés de oscilar manualmente, pode-se também utilizar um gerador de áudio (no qual controla-se a frequência), ou um computador com alto falante e um software específico que faça isso.

Análise e Explicação

Cada anel entra em ressonância a partir de uma determinada frequência. O anel maior responde a frequências mais baixas e o anel menor vibra em frequências mais altas.

A frequência ressonante de cada anel depende de vários fatores, entre os quais a sua massa e a sua rigidez. Objetos mais rígidos têm frequências ressonantes mais altas, enquanto que objetos mais densos respondem à frequências mais baixas. O anel de maior diâmetro, por exemplo, tem a maior massa, mas é o mais flexível (menos rígido) de todos e por isso responde à baixas frequências. Uma outra aplicação conceitual é que o anel maior leva mais tempo para responder às forças excitantes.

Os anéis dispostos sobre o papelão podem ser relacionados com construções sobre a superfície terrestre, e a oscilação do papelão corresponderia à um terremoto. Durante um terremoto as frequências de vibrações da terra seguem um determinado padrão, de modo que geralmente caem ou as construções grandes (ou altas), ou as construções pequenas (ou baixas). Não existe terremoto que derrube as construções grandes e as pequenas ao mesmo tempo, pois elas não respondem as mesmas frequências. Nas baixas frequências, somente as construções grandes caem e nas altas frequências somente as construções pequenas caem.

É importante destacar que outros fatores, além do tamanho, como o modo como a construção foi construída, e o tipo de material utilizado, influenciam nas frequências ressonantes de uma construção.

2.11 Ressonância Forçada 1

Objetivo

Verificar como ocorre o fenômeno da ressonância de um pêndulo.

Materiais Utilizados

1 fio, 1 folha de papel amassado.

Montagem e Procedimento

Amarre a folha amassada na extremidade do fio, de modo a formar um pêndulo. Suspenda o pêndulo na frente da sua boca e, através de jatos pulsados de ar, coloque o pêndulo a oscilar, tentando imprimir-lhe a maior amplitude de oscilação possível (Fig.2.12).

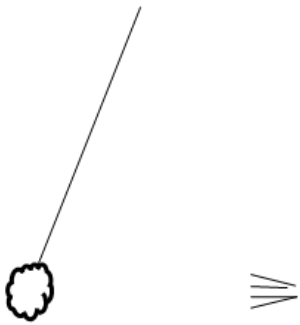

Figura 2.12: Jatos de ar sobre o pêndulo.

Você perceberá que o pêndulo irá aumentar a sua amplitude de oscilação quando a frequência dos jatos de ar for igual a frequência de oscilação do pêndulo.

Análise e Explicação

Todo sistema físico capaz de vibrar, se for excitado, vibrará em uma ou mais frequências naturais de vibração. O fenômeno da ressonância ocorre

quando um sistema físico recebe energia por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração. Ao receber energia dessas ondas, o sistema físico passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores.

O pêndulo tem uma frequência natural de oscilação dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$

Ele aumentará sua amplitude quando ocorrer ressonância com os jatos de ar. Por isso, a frequência dos jatos de ar deve ser igual à frequência de oscilação do pêndulo.

2.12 Ressonância Forçada 2

Objetivo

Provocar o fenômeno da ressonância num pêndulo.

Materiais Utilizados

1 Arame grosso, 4 pedaços de linha, 1 alicate, 4 porcas iguais (de parafuso), 1 tesoura, 1 suporte para o arame.

Montagem e Procedimento

Dobre o arame formando 4 poços pequenos igualmente espaçados um do outro. Dobre a própria ponta do arame e faça uma manivela. Amarre no fundo dos poços uma das pontas de cada pedaço de fio e na ponta de cada um desses, uma porca. Pendure os pêndulos com comprimentos diferentes. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(2.13).

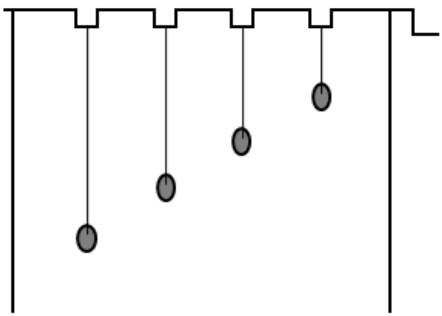

Figura 2.13: Pêndulos suspensos no arame.

Execute o movimento de vai e vem com a manivela, sempre no mesmo ritmo. Aos poucos torne o movimento mais rápido e compare o ritmo da manivela com a resposta de cada pêndulo. Com o movimento da manivela você transfere energia para os pêndulos. Perceba que eles têm frequências de oscilações diferentes.

Tente acompanhar o movimento de oscilação de um dos pêndulos, girando a manivela na mesma frequência que ele. Observe que, enquanto os outros pêndulos oscilam com baixa amplitude, o pêndulo que você acompanhou o movimento passa a oscilar em amplitudes cada vez maior. Repita o procedimento com outro pêndulo.

Análise e Explicação

No experimento do pêndulo simples o período e a frequência não depende da massa, enquanto que neste experimento, para uma mesma quantidade de energia do sistema, a amplitude de oscilação depende da massa.

Para provocar o aumento da amplitude de oscilação de um deles é necessário fazer coincidir a frequência de excitação da manivela com a frequência natural de oscilação. Nesse caso temos a ressonância, onde a amplitude do pêndulo aumenta gradativamente.

2.13 Vibração de uma Taça

Objetivo

Verificar a vibração de uma taça.

Materiais Utilizados

1 taça de cristal (pode ser também de vidro), água.

Montagem e Procedimento

Estando o dedo molhado, esfregue-o levemente em círculos na borda da taça. Ajuste a velocidade de modo que a taça começe a vibrar, produzindo um zumbido numa certa freqüência específica. Varie o nível de água dentro da taça e perceba que, quanto mais cheia ela estiver, menor a freqüência do som por ela emitido.

Análise e Explicação

Ao absorver grande parte da energia provocada pelo atrito com o dedo, a taça de cristal acaba devolvendo parte dessa energia em forma de som. Quando varia-se o nível de água, altera-se as condições de ressonância da taça, fazendo com que ela vibre em freqüências diferentes.

É mais fácil provocar essa vibração com a taça de cristal do que com outros tipos de vidros. O vidro comum é mole e vibra mal, não tendo uma freqüência de ressonância forte. O cristal vibra bem, emite um som limpo ao ser tocado e é mais forte por causa da presença do óxido de chumbo. Cada taça é diferente é tem uma freqüência única de vibração.

2.14 Ressonância de uma Taça

Objetivo

Observar a ressonância de uma taça de vidro quando submetida à ondas sonoras.

Materiais Utilizados

1 taça de vidro, 1 canudo de refrigerante, 1 microcomputador com software gerador de áudio[4] (no qual pode-se controlar a frequência) e caixa de som.

Montagem e Procedimento

Coloque a caixa de som próximo da taça. Varie a frequência de saída do som no software e perceba que, quando a taça for excitada continuamente por um som razoavelmente intenso e de frequência adequada, ela entra em ressonância e passa a vibrar. A vibração é percebida mais facilmente se for colocado dentro da taça um canudo de refrigerante. Numa situação extrema, mas difícil de conseguir, a taça atinge um grau de vibração tão elevado que acaba se quebrando. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(2.14).

Análise e Explicação

Cada pedaço de vidro, assim como todos os materiais, possui uma frequência ressonante. Taças de vidro são especialmente ressonantes devido à sua estrutura tubular interna oca, que produz um som agradável ao tinir. Se for gerado um som com frequência exata (produzida por software ou por voz humana, sendo esta última mais difícil, mas possível), as moléculas do ar em volta da taça vibrarão nessa mesma frequência e forçarão a taça também a vibrar.

Além do som emitido pela caixa de som ser na frequência certa, ele deve ter alta intensidade para fazer oscilar as moléculas da taça. Para conseguir

[4]Como exemplo cita-se o software *Sine Wave Generator*, usado para este e outros experimentos de ondulatória.

Figura 2.14: Caixa de som e taça.

quebrá-la, deve existir defeitos microscópicos suficientemente grandes no vidro, o qual cede à pressão do som e acaba se rompendo[5]. Se o som emitido prolongar durante vários segundos mantendo uma dessas frequências ressonantes, as vibrações da taça podem crescer em amplitude até um nível tal que ela se quebre.

Alguns cantores de ópera conseguem quebrar taças de vidro quando emitem sons muito fortes e extremamente agudos. Conseguir quebrar uma taça é um processo bem difícil, mas é possível ajustar a frequência do som incidente de modo que, pelo menos, ela consiga vibrar.

[5]Todas as taças têm defeitos, mas alguns deles são favoráveis à quebra com o aumento da oscilação.

2.15 Telefone de Cordel

Objetivos

Desenvolver o experimento do telefone de cordel[6] e explicitar as características envolvidas na transmissão de ondas sonoras.

Materiais Utilizados

2 copos plásticos (ou 2 latas vazias), 1 prego, um pedaço de linha (de alguns metros de comprimento).

Montagem e Procedimento

Com o prego faça um furo no centro de cada um dos copos plásticos ou das latas vazias. Conecte-os por um pedaço de linha, fazendo alguns nós nas extremidades para que ela não se solte (Fig.2.15).

Figura 2.15: Telefone de cordel.

Com a ajuda de um colega, segure um copo cada, de modo que a linha fique razoavelmente esticada. Enquanto um leva o copo a boca para falar o outro coloca o copo no ouvido para ouvir. Mesmo falando baixinho é possível ouvir pelo copo o que o outro fala. Os 2 copos devem ser segurados levemente pela borda para deixá-los livres para vibrar.

Análise e Explicação

O copo no qual a pessoa fala vibra, de acordo com as ondas sonoras que ele recebe. As vibrações se propagam pela linha, fazendo o outro copo

[6]Corda fina, barbante.

também vibrar. Essas vibrações produzem novamente ondas sonoras, as quais são captadas pelo ouvinte.

Nesse experimento o som produzido não é igual ao original. No entanto, mesmo com toda a simplicidade é possível constatar a propagação do som de um lado para o outro. O copo ou a lata não reagem às frequências mais baixas da voz e, portanto, as palavras chegam ao receptor em tons mais agudos.

Constata-se experimentalmente que a velocidade de propagação v de um pulso transversal ou de uma onda periódica transversal numa corda depende apenas da densidade linear δ da corda e da intensidade da força tensora F a que ela está submetida. Assim, tem-se que:

$$v = kF^x\delta^y \tag{2.23}$$

onde k é uma constante que não possui dimensões físicas, x e y são expoentes a serem determinados e:

$$\delta = \frac{m}{l} \tag{2.24}$$

onde m é a massa e l o comprimento da corda.

Fazendo uma análise dimensional[7] de cada componente da Eq.(2.23) tem-se:

$$[v] = M^0LT^{-1} \tag{2.25}$$

$$[F] = MLT^{-2} \tag{2.26}$$

$$[\delta] = ML^{-1}T^0 \tag{2.27}$$

Levando (2.25), (2.26) e (2.27) em (2.23):

$$M^0LT^{-1} = (MLT^{-2})^x(ML^{-1})^y$$

vem que:

$$M^0LT^{-1} = M^{(x+y)}L^{(x-y)}T^{-2x}$$

[7] A toda grandeza medida ou calculada está associada uma dimensão. As grandezas mecânicas massa, comprimento e tempo são elementares e servem como dimensões fundamentais, e são representadas respectivamente por M, L e T. Todas as equações devem ser dimensionalmente consistentes, ou seja, as dimensões nos dois lados de uma equação devem ser as mesmas. Os colchetes [ ] são usados para denotar a dimensão da grandeza.

Relacionando as componentes dos dois membros da equação obtêm-se: $x + y = 0$, $x - y = 1$ e $-2x = -1$, donde vem que $x = 1/2$ e $y = -1/2$. Dessa forma, a Eq.(2.23) fica $v = kF^{1/2}\delta^{-1/2}$, ou:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\delta}} \tag{2.28}$$

já que experimentalmente comprova-se que $k = 1$.

Considerando que as cordas são cilíndricas, tem-se que o volume delas é dado por $V = \pi r^2 l$. Sendo a densidade absoluta (volumétrica) μ definida como $\mu = m/V$, tem-se $\mu = m/\pi r^2 l$, donde vem:

$$m = \mu \pi r^2 l \tag{2.29}$$

Relacionando (2.29) com (2.24):

$$\delta = \mu \pi r^2 \tag{2.30}$$

Levando (2.30) em (2.28), obtem-se que a velocidade em cordas é dada por:

$$v = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \tag{2.31}$$

No telefone de cordel, quanto mais esticado estiver o barbante melhor o seu funcionamento. De acordo com a Eq.(2.31), quanto mais esticada estiver a corda (maior tensão F), maior é a velocidade de propagação. Se a tensão fosse nula, a velocidade seria nula também.

A velocidade não depende diretamente da espessura do fio, mas sim, é inversamente proporcional à raiz quadrada da sua densidade linear δ. Para um mesmo comprimento, fios mais leves transmitem a onda mais rapidamente.

2.16 Ondas Estacionárias em Cordas

Objetivo

Gerar e analisar ondas estacionárias em cordas.

Materiais Utilizados

1 fio, 1 porta pesos, massas diversas, 1 balança de precisão, 1 microcomputador com software gerador de frequência[8], 1 caixinha de som, cola, 1 trena (ou 1 régua), 1 roldana.

Montagem e Procedimento

Usando cola prenda uma extremidade do fio no centro do alto falante da caixa de som, sendo este preso num suporte, o qual pode ser deslocado sobre a mesa. Isso pode ser feito retirando a parte da frente de uma das caixinhas de som do computador, deixando o alto-falante exposto. Passe o fio pela roldana e na outra extremidade amarre um porta pesos, no qual vão ser penduradas as massas (Fig.2.16).

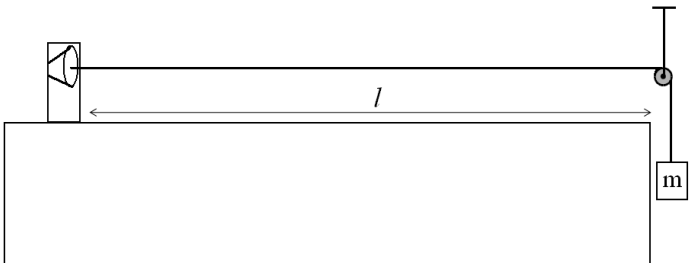

Figura 2.16: Fio esticado preso no alto falante.

No computador gera-se um sinal sonoro por um software específico, no qual controla-se a frequência. Dessa forma, produz-se um sinal de frequência conhecida, o qual é amplificado e gerado pelo alto-falante, que faz o fio

[8] *Sine Wave Generator*, por exemplo.

vibrar. Faça o fio entrar em ressonância e obtenha os primeiros harmônicos de vibração.

Obtem-se as condições de ressonância no fio (Fig.2.17) de diversas maneiras: variando a frequência de oscilação da corda (no software), alterando a sua tensão (variando as massas suspensas) ou mudando o seu comprimento (aproximando ou distanciando o alto falante da roldana).

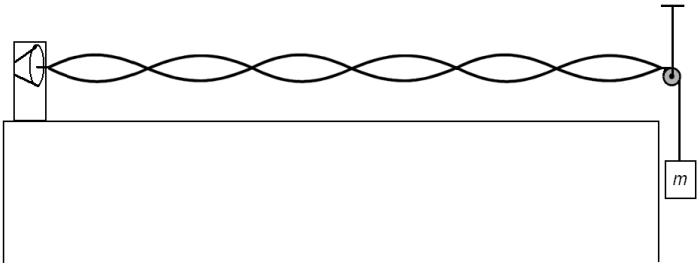

Figura 2.17: Ondas estacionárias no fio.

Análise e Explicação

Se uma corda tensionada for tracionada transversalmente, haverá o aparecimento de ondas que nela se propagarão. A propagação de tais ondas e sua reflexão nas extremidades da corda causa a superposição de ondas, originando uma onda estacionária com nós em suas extremidades.

A seguir serão analisados os primeiros modos possíveis de vibração para uma corda. O primeiro harmônico, que é o primeiro modo de vibração, é denominado modo fundamental, e corresponde a formação de 1 ventre e 2 nós, e está representado na Fig.(2.18).

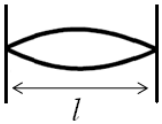

Figura 2.18: Primeiro harmônico.

Nesse caso tem-se formado meio comprimento de onda, de modo que $l = \lambda_1/2$, ou:

$$\lambda_1 = 2l$$

Sendo que $v = \lambda f$, vem que a frequência do primeiro harmônico é:

$$f_1 = \frac{v}{2l}$$

O segundo modo de vibração, denominado segundo harmônico, corresponde a formação de 3 nós e 2 ventres, como representado na Fig.(2.19).

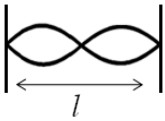

Figura 2.19: Segundo harmônico.

Sendo que, cada ventre formado corresponde a meio comprimento de onda, nesse caso tem-se $l = 2(\lambda_2/2)$, donde vem:

$$\lambda_2 = l$$

Dessa forma, a frequência do segundo harmônico é:

$$f_2 = \frac{v}{l}$$

O terceiro harmônico corresponde a formação de 4 nós e 3 ventres, o qual está ilustrado na Fig.(2.20).

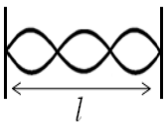

Figura 2.20: Terceiro harmônico.

Aqui tem-se que $l = 3(\lambda_3/2)$, donde vem:

$$\lambda_3 = \frac{2l}{3}$$

e

$$f_3 = \frac{3v}{2l}$$

Após analisar os 3 primeiros harmônicos pode-se generalizar as expressões para o comprimento de onda e para a frequência do enésimo harmônico, como sendo:

$$\lambda_n = \frac{2l}{n}$$

$$f_n = \frac{nv}{2l}$$

onde $n = 1, 2, 3, ...$

2.17 Ondas Estacionárias numa Mola

Objetivo

Demonstrar a formação de ondas estacionárias.

Materiais Utilizados

1 mola grossa de encadernação.

Montagem e Procedimento

Tensione a mola prendendo uma de suas extremidades. Segure a outra extremidade com a mão, deixando-a na horizontal, e coloque-a à oscilar na vertical, produzindo ondas transversais. Altere a frequência de oscilação da mola, de modo a representar os seus primeiros harmônicos.

Análise e Explicação

Uma corda presa nas suas extremidades, sob uma força de tensão que a mantém esticada, tem associada uma oscilação ressonante, seguindo um padrão de onda estacionária.

Maiores explicações foram dadas no Exp.(2.16).

2.18 Velocidade de Ondas em Cordas

Objetivo

Determinar a velocidade de propagação de ondas em uma corda através da análise de ondas estacionárias.

Materiais Utilizados

Este experimento utiliza os mesmos materiais do Exp.(2.16).

Montagem e Procedimento

A montagem é a mesma do Exp.(2.16). Inicialmente meça o comprimento da corda com a régua. Com o software ajuste a frequência de oscilação da corda de modo que se forme uma onda estacionária com apenas 1 ventre. Em seguida vá aumentando a frequência de oscilação da corda para que haja a formação dos outros harmônicos, cada qual com o correspondente número de ventres.

Conhecendo a frequência f, o comprimento de onda λ e o valor de n, determine a velocidade de propagação v da onda na corda.

Análise e Explicação

Na Tab.(2.3) há os dados experimentais de f e λ para uma corda estacionária de $l = 0,54m$ de comprimento. O comprimento de onda no harmônico n é dado por $\lambda_n = 2l/n$ e a velocidade de propagação por $v = \lambda f$.

Tabela 2.3: Dados de ondas estacionárias numa corda.

n	$f(Hz)$	$\lambda(m)$	$v(m/s)$
1	26	1,08	28,08
2	52	0,54	28,08
3	78	0,36	28,08
4	104	0,27	28,08

Fazendo uma média das velocidades obtidas encontra-se que a velocidade de propagação da onda mecânica na corda é $v = 28,08m/s$.

2.19 Som Emitido por um Fio Esticado

Objetivo

Verificar a relação entre tensão e espessura de uma corda e a frequência do som por ela emitida.

Materiais Utilizados

1 violão.

Montagem e Procedimento

Faça oscilar cada corda do violão e perceba a frequência do som emitido. Varie a tensão numa corda, bem como o seu comprimento de oscilação (pressionando a corda no braço do violão) e perceba como se comporta a frequência do som emitido.

Análise e Explicação

Como visto no Exp.(2.16), a frequência de vibração de uma corda é dada por:

$$f = \frac{nv}{2L} \tag{2.32}$$

onde $n = 1, 2, 3, ...$

A velocidade de propagação de ondas transversais é (como visto no Exp.2.15):

$$v = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \tag{2.33}$$

onde r é o raio de seção transversal da corda, F a intensidade da força tensora, e μ a massa específica do material que constitui a corda.

Levando (2.33) em (2.32) e sendo $D = 2r$, onde D é o diâmetro da seção transversal da corda:

$$f = \frac{n}{DL}\sqrt{\frac{F}{\mu\pi}} \tag{2.34}$$

Perceba que a frequência de vibração (considerada a fundamental $n = 1$) depende do diâmetro e do comprimento da corda, da massa específica do material que a constitui a corda e da intensidade da força que a traciona.

Supondo fixa as demais variáveis, a frequência do som fundamental emitido é inversamente proporcional ao diâmetro da corda. Quanto mais grossa a corda, menor a frequência de vibração.

Da mesma forma, considerando fixa as outras variáveis, a frequência emitida é inversamente proporcional ao comprimento da corda. Esse comprimento da corda vibrante é alterado através das posições, onde pressiona-se as cordas no braço do violão. Quanto menor é o comprimento da corda vibrante, maior é a frequência do som emitido.

Sem variar as outras variáveis, o som emitido possui frequência proporcional à raiz quadrada da força tensora. Aumentando-se a tensão na corda aumenta-se a sua frequência de vibração.

Considerando fixa as demais variáveis a frequência do som emitido é inversamente proporcional à raiz quadrada da massa específica do material que constitui a corda. Quanto maior o valor da massa específica, menor a frequência emitida. Por exemplo, se em um violão substitui-se uma corda de náilon por uma corda metálica de mesmo diâmetro e sujeita a mesma tensão, obtem-se um som de menor frequência, já que a massa específica da corda metálica é maior que a de náilon.

De maneira geral, a frequência f de uma corda vibrante depende da suadensidade linear μ, do seu comprimento l e da sua tensão T. Esticando a corda os dois primeiros fatores se mantém constante e o aumento da tensão eleva a frequência de vibração.

2.20 Rasgando um Tecido

Objetivo

Observar a formação de um som característico ao rasgar um pedaço de tecido.

Materiais Utilizados

1 pedaço de tecido (pouco resistente).

Montagem e Procedimento

Rasgue o pedaço de tecido e perceba a geração de um som característico durante o processo. Por que isso ocorre?

Análise e Explicação

As ondas sonoras são ondas mecânicas que se propagam através de um sólido, de um líquido ou de um gás. Elas são produzidas por deformações provocadas pela diferença de pressão num meio material elástico.

Qualquer movimento periódico pode produzir ondas sonoras. Neste experimento, quando o tecido é rasgado, o movimento periódico que acompanha o rompimento dos fios individuais origina as ondas sonoras características.

2.21 Ondas Estacionárias em Tubos Abertos

Objetivo

Verificar a formação de ondas estacionárias num tubo sonoro aberto.

Materiais Utilizados

1 tubo cilíndrico transparente, 1 microcomputador com software gerador de frequências, 1 caixinha de som, pó fino (ou serragem fina, pó de giz, bolinhas finas de isopor, etc.).

Montagem e Procedimento

Disponhe o tubo na horizontal e a caixinha de som próximo de uma de suas extremidades. A caixinha de som deve estar conectada ao computador, o qual gerará o som com frequências específicas. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(2.21).

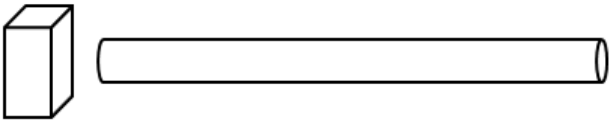

Figura 2.21: Tubo sonoro aberto.

Espalhe o pó dentro do tubo para melhor verificar a ocorrência da ressonância. Ligue o som e ajuste a frequência de saída do mesmo, até que ocorra a ressonância. Quando isso ocorrer observe uma vibração intensa do pó, que começa a se agrupar em certas regiões (nós) e se afastar das outras (cristas). Perceba também neste momento uma amplificação do som.

Uma variação mais sofisticada deste experimento é feita colocando um microfone no interior do tubo, em diferentes posições quando ocorre a ressonância. Grava-se o som num outro computador e depois analisa-o graficamente num software específico[9].

[9]Como exemplo de um software utilizado para essa finalidade cita-se o *Audacity*.

Análise e Explicação

Tubos sonoros são tubos ocos nos quais pode-se confinar uma coluna de ar. Esta, quando excitada em uma de suas frequências naturais, produz ressonância. Uma vez perturbado, o ar dentro do tubo vibra com uma certa variedade de frequências, mas somente certas frequências persistem, sendo estas as compatíveis com um sistema de ondas estacionárias. As frequências com as quais formam-se ondas estacionárias são as frequências naturais ou frequências ressonantes.

Uma onda estacionária ocorre quando uma onda contrária percorre um meio, reflete-se em algum obstáculo, volta e interfere com a onda original. É uma superposição de ondas de iguais frequências e amplitudes que se propagam no mesmo meio, numa mesma direção e em sentidos opostos. O nome das ondas estacionárias deve-se ao fato de ter-se a impressão de que não há nada se propagando, pois não consegue-se distinguir a onda progressiva da onda retrógrada.

Os instrumentos musicais de sopro (flauta e pistão, por exemplo) são construídos essencialmente por tubos sonoros, nos quais uma coluna de ar é posta a vibrar, soprando-se a extremidade chamada de embocadura, a qual possui dispositivos vibrantes apropriados.

Nos tubos sonoros os sons são produzidos por fluxos de ar em uma das suas extremidades. Esses sons compõem-se de várias frequências, mas só ressoam ou se amplificam aquelas que correspondem aos harmônicos da coluna gasosa.

Do mesmo modo que numa corda, as vibrações das colunas gasosas podem ser estudadas como ondas estacionárias resultantes da interferência do som emitido numa extremidade com o som refletido na outra extremidade do tubo. Os tubos sonoros podem ser abertos ou fechados. No tubo aberto, as duas extremidades são abertas, como neste experimento. Em uma extremidade aberta o som reflete-se em fase, havendo aí um ventre de deslocamento.

Na Fig.(2.22) tem-se as 3 primeiras configurações de ondas estacionárias num tubo sonoro aberto.

Para determinar as características das ondas estacionárias segue-se um procedimento semelhante ao utilizado no estudo de ondas estacionárias em cordas.

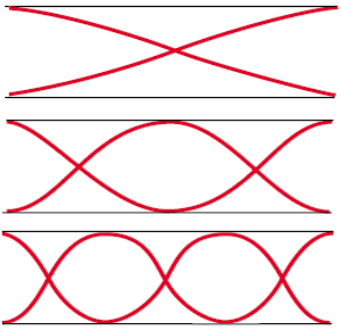

Figura 2.22: Três primeiras ondas estacionárias num tubo sonoro aberto.

No 1° harmônico $l = 1(\lambda_1/2)$, donde vem:

$$\lambda_1 = 2l$$

onde l é o comprimento do tubo.

No 2° harmônico $l = 2(\lambda_2/2)$, donde vem:

$$\lambda_2 = l$$

No 3° harmônico: $l = 3(\lambda_3/2)$, donde vem:

$$\lambda_3 = \frac{2l}{3}$$

De maneira geral tem-se que no enésimo modo de vibração, o comprimento de onda será:

$$\lambda_n = \frac{2l}{n}$$

e a frequência:

$$f_n = \frac{nv}{2l}$$

onde $n = 1, 2, 3, ...$ Em termos do harmônico fundamental $f_1 = v/2l$, a enésima frequência f_n é escrita como:

$$f_n = nf_1$$

No tubo sonoro aberto, da mesma forma que na corda vibrante, obtêm-se as frequências naturais de todos os harmônicos.

2.22 Ondas Estacionárias em Tubos Fechados

Objetivo

Verificar a formação de ondas estacionárias em tubos sonoros fechados.

Materiais Utilizados

1 tubo cilíndrico transparente, 1 microcomputador com software específico, 1 caixinha de som, pó fino (ou serragem fina, pó de giz, bolinhas finas de isopor, etc.), 1 haste com êmbolo (que se ajuste dentro do tubo).

Montagem e Procedimento

Disponhe o tubo na horizontal, espalhe o pó no seu interior, e coloque a caixinha de som próximo de uma de suas extremidades. Na outra extremidade introduza a haste com o êmbolo. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(2.23).

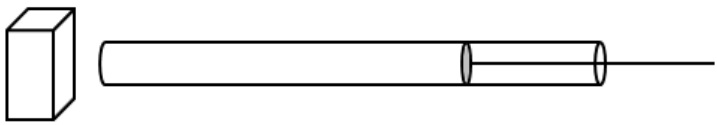

Figura 2.23: Tubo sonoro fechado.

Neste experimento as condições de ressonância podem ser obtidas variando a frequência do som que sai da caixinha (sendo este ajustado no software no computador) e/ou o comprimento do tubo, através do deslocamento do embolo dentro dele[10]. Observe quando ocorre a ressonância.

[10] Outra forma de variar o comprimento do tubo com ar é colocando-o na vertical e variando o nível de água no seu interior através do seu ajuste dentro de um recipiente contendo água.

Análise e Explicação

Um tubo sonoro é dito fechado quando possui uma de suas extremidades fechadas. Ao incidir numa extremidade fechada o som é refletido com inversão de fase, formando aí um nó da onda estacionária. Isso ocorre porque nesse local as partículas de ar não podem vibrar.

Na Fig.(2.24) temos as 3 primeiras configurações de ondas estacionárias em tubos fechados.

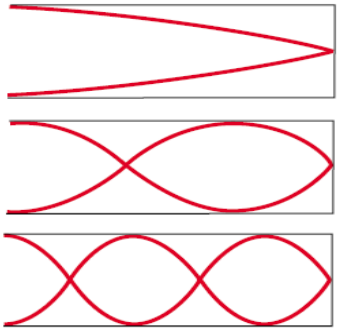

Figura 2.24: Três primeiras ondas estacionárias num tubo sonoro fechado.

Os 3 primeiros harmônicos formados possuem as seguintes características:

1° harmônico: $l = 1(\lambda_1/4)$,

$$\lambda_1 = 4l$$

3° harmônico: $l = 3(\lambda_3/4)$,

$$\lambda_3 = \frac{4l}{3}$$

5° harmônico: $l = 5(\lambda_5/4)$,

$$\lambda_5 = \frac{4l}{5}$$

O enésimo modo de vibração será com:

$$\lambda_n = \frac{4l}{n}$$

$$f_n = \frac{nv}{4l}$$

onde $n = 1, 3, 5, ...$ Em função de f_1 a enésima frequência é dada por:

$$f_n = nf_1$$

Como pode-se observar, no tubo sonoro fechado obtêm-se as frequências naturais apenas dos harmônicos ímpares.

2.23 Ondas Estacionárias em Tubos Fechados 2

Objetivo

Verificar a formação de ondas estacionárias em tubos sonoros fechados.

Materiais Utilizados

Tubos de ensaio (uns 4 ou 5 tubos iguais), 1 suporte para tubos de ensaio, água.

Montagem e Procedimento

Disponha os tubos de ensaio verticalmente no suporte e coloque água neles, de modo que eles fiquem com colunas líquidas de diferentes alturas, como mostra a Fig.(2.25).

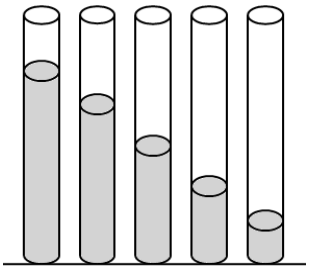

Figura 2.25: Tubos de ensaio com colunas líquidas.

Assopre dentro de cada tubo com a mesma intensidade e ouça a frequência do som por cada um produzido.

Análise e Explicação

A existência de água em diferentes níveis nos tubos de ensaio faz com que a coluna de ar no interior destes tenham diferentes comprimentos. Quando um jato de ar é introduzido (soprado) no tubo ele provoca vibrações que se propagam na coluna de ar no seu interior, o que origina um som característico.

A frequência emitida pela vibração da coluna de ar no interior do tubo fechado é dada por:

$$f_n = \frac{nv}{4l}$$

onde n é o número do harmônico (harmônicos ímpares), v a velocidade de propagação do som no ar e l o comprimento da coluna de ar. Considerando o primeiro harmônico ($n = 1$), vem que:

$$f_1 = \frac{v}{4l}$$

Aumentando-se o comprimento da coluna de ar (l) nota-se que a frequência do som emitido diminui. Assoprando os tubos da esquerda para a direita na Fig.(2.25) percebe-se que o som escutado torna-se mais grave (menor frequência).

2.24 Velocidade do Som no ar

Objetivo

Determinar a velocidade do som no ar através do estudo de tubos sonoros.

Materiais Utilizados

Este experimento utiliza os mesmos materiais dos Exps.(2.21) e (2.22), mais 1 trena.

Montagem e Procedimento

Através da medida do comprimento dos tubos aberto e fechado, do número do harmônico e da frequência sonora em que ocorre a ressonância, determine a velocidade de propagação do som no ar.

Análise e Explicação

Na Tab.(2.4) há os dados experimentais obtidos para um tubo sonoro aberto de $l = 0,87m$ de comprimento. O comprimento de onda para o harmônico n é determinado por $\lambda_n = 2l/n$, e a velocidade correspondente por $v = \lambda f$.

Tabela 2.4: n, f, λ e v para um tubo sonoro aberto.

n	$f(Hz)$	$\lambda(m)$	$v(m/s)$
1	190	1,74	330,6
2	380	0,87	330,6
3	570	0,58	330,6
4	768	0,43	330,24
5	950	0,35	332,5
6	1140	0,29	330,6

Fazendo uma média das velocidades obtidas vem que a velocidade de

propagação do som dentro do tubo é:

$$v = 330,86m/s$$

Para um tubo sonoro fechado de $l = 0,505m$ de comprimento, os dados obtidos estão na Tab.(2.5). Neste caso o comprimento de onda para o harmônico de ordem n é determinado por $\lambda_n = 4l/n$.

Tabela 2.5: n, f, λ e v para um sonoro fechado.

n	$f(Hz)$	$\lambda(m)$	$v(m/s)$
1	165	2,02	333,3
3	517	0,64	330,9
5	830	0,40	332,0
7	1160	0,29	336,4

Fazendo uma média das velocidades obtidas vem que a velocidade de propagação do som dentro do tubo é:

$$v = 333,15m/s$$

Estes valores encontrados ficam próximos do valor já conhecido da velocidade do som no ar. A velocidade do som é fortemente influenciada pela temperatura do ar, sendo dada (em m/s) por:

$$v = 330,4 + 0,59T$$

onde T é a temperatura dada em $^\circ C$.

2.25 Efeito Doppler

Objetivo

Verificar o efeito Doppler.

Materiais Utilizados

1 fonte sonora móvel (um celular, por exemplo).

Montagem e Procedimento

Movimente a fonte sonora com um determinado som específico, de modo que ela se aproxime e depois se afaste do seu ouvido. Perceba que, quando a fonte se aproxima o som fica mais agudo (mais fino) e quando se afasta o som fica mais grave (mais grosso).

O mesmo fenômeno pode ser verificado ficando ao lado de uma estrada, por onde passam automóveis em alta velocidade. Nota-se que o barulho produzido por um automóvel (em específico) vai ficando mais agudo à medida que ele se aproxima, e mais grave quando ele se afasta[11].

Análise e Explicação

O efeito doppler é a alteração da frequência percebida pelo observador em virtude do movimento relativo de aproximação ou de afastamento entre a fonte e o observador.

Embora este efeito seja característico de qualquer tipo de onda, ele é mais comumente percebido em ondas sonoras. Quando a fonte sonora aproxima-se do observador parece que o som fica mais agudo (maior frequência), e quando a fonte afasta-se tem-se a sensação que o som torna-se mais grave (menor frequência).

Na sequência será detalhado matematicamente esse efeito. Considere uma fonte sonora F que emite ondas concêntricas com frequência única f_F,

[11] É importante aqui saber diferenciar a frequência da intensidade do som analisado.

e dois observadores fixo O_1 e O_2. Se não há movimento da fonte e dos observadores (Fig.2.26-a), tanto O_1 como O_2 percebe o mesmo comprimento de onda λ_F e a mesma frequência f_F.

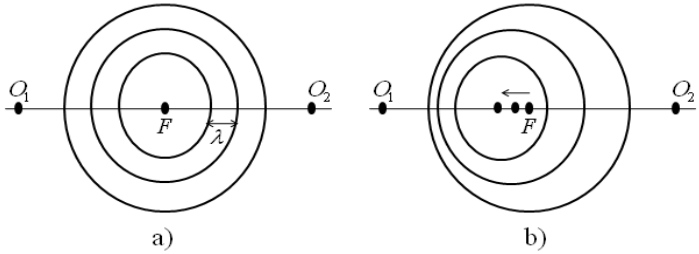

Figura 2.26: a- F, O_1 e O_2 fixos; b- O_1 e O_2 fixos e F deslocando-se para a esquerda.

Supondo agora que os observadores estão fixos mas a fonte F desloca-se para a esquerda, emitindo ondas de comprimento λ_F (Fig.2.26-b). O movimento de F faz com que as frentes de onda se juntem mais do lado esquerdo e se separem mais do lado direito, fazendo com que, num mesmo intervalo de tempo, O_1 receba mais frentes de onda do que receberia se a fonte F não se movesse. Dessa forma, O_1 percebe uma frequência f_1 maior que f_F e um comprimento de onda λ_1 menor que λ_F, enquanto O_2 percebe uma frequência f_2 menor que f_F e um comprimento de onda λ_2 maior que λ.

Entre a emissão de uma frente de onda e a emissão seguinte, a fonte F percorre uma distância igual à $v_F T$, em que T é o período do som emitido pela fonte. Assim, tem-se que O_1 detecta um comprimento de onda λ_1 dado por:

$$\lambda_1 = \lambda_F - v_F T \tag{2.35}$$

Sendo $\lambda = v/f$ e $T = 1/f$, onde v é a velocidade de propagação do som, escreve-se (2.35) como:

$$\frac{v}{f_1} = \frac{v}{f_F} - \frac{v_F}{f_F}$$

donde vem:

$$f_1 = \frac{v f_F}{v - v_F} \tag{2.36}$$

O observador O_2 capta um comprimento de onda λ_2 dado por:

$$\lambda_2 = \lambda_F - v_F T \tag{2.37}$$

De maneira semelhante que foi encontrado (2.36), a partir de (2.37) vem que:

$$f_2 = \frac{v f_F}{v + v_F} \tag{2.38}$$

Considere agora a fonte F fixa e os observadores O_1 e O_2 em movimento, sendo O_1 se aproximando de F e O_2 se afastando, como mostra a Fig.(2.27).

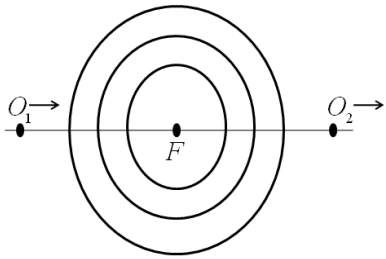

Figura 2.27: F fixo e O_1 e O_2 deslocando-se para a direita.

Se O_1 estivesse em repouso, ele receberia n ondas completas num intervalo de tempo Δt, percebendo a frequência $f_F = n/\Delta t$, que é a frequência da fonte. Estando em movimento com velocidade v_{O_1}, o observador O_1 percorre a distância $v_{O_1}\Delta t$ durante esse intervalo de tempo e recebe $v_{O_1}\Delta t/\lambda$ vibrações além de n. Sendo que O_1 aproxima-se de F, ele percebe uma frequência f_1 dada por:

$$f_1 = \frac{n + v_{O_1}\Delta t/\lambda}{\Delta t} = f_F + \frac{v_{O_1} f_F}{v}$$

donde vem:

$$f_1 = \frac{f_F(v + v_{O_1})}{v} \tag{2.39}$$

O observador O_2 recebe $v_{O_2}\Delta t/\lambda$ vibrações a menos do que receberia se estivesse em repouso, percebendo uma frequência f_2 dada por:

$$f_2 = \frac{n - v_{O_2}\Delta t/\lambda}{\Delta t} = f_F - \frac{v_{O_2} f_F}{v}$$

donde vem:

$$f_2 = \frac{f_F(v - v_{O_2})}{v} \tag{2.40}$$

Relacionando as Eqs.(2.36), (2.38), (2.39) e (2.40), obtem-se a fórmula geral para a frequência doppler ou frequência aparente f captada pelo observador:

$$f = f_F \left(\frac{v \pm v_O}{v \pm v_F} \right) \tag{2.41}$$

Quanto aos sinais de (2.41), para v_0 utiliza-se $+$ quando o observador aproxima-se da fonte e $-$ quando ele se afasta. Para v_F utiliza-se $+$ quando a fonte se afasta do observador e $-$ quando ela se aproxima dele.

2.26 Estalos Supersônicos

Objetivo

Provocar estalos supersônicos com um chicote.

Materiais Utilizados

1 chicote.

Montagem e Procedimento

Movimente o chicote de modo que sua ponta execute um movimento brusco, produzindo um estalo. Por que ocorre esse estalo?

Análise e Explicação

O estalo do chicote é provocado pela onda de choque criada quando a sua ponta se movimenta mais rápido do que a velocidade do som no ar, que é de cerca de $1200km/h$.

Qualquer objeto em movimento provoca um deslocamento de ar em sua frente, o que origina uma onda mecânica. Se a fonte se encontra parada as ondas geradas são esféricas e se propagam de maneira concêntrica à fonte (Fig.2.28-a). No entanto, se a fonte geradora de ondas se movimentar, as ondas tendem a se acumular na sua frente (Fig.2.28-b).

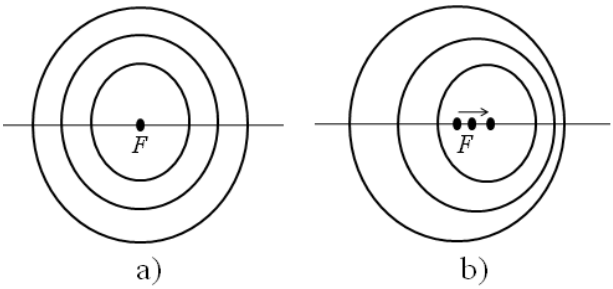

Figura 2.28: Fonte em: a- Repouso; b- Movimento para a direita.

Quando a velocidade da fonte se iguala a velocidade do som, as ondas avançam junto com a fonte, o que gera um grande estrondo, que é o resultado da chegada simultânea das ondas. Pode-se dizer que o estalo do chicote é um estrondo supersônico, que ocorre quando a velocidade da fonte supera a velocidade de propagação do som.

2.27 Difração de uma Onda

Objetivo

Verificar a difração de uma onda sonora.

Materiais Utilizados

1 rádio.

Montagem e Procedimento

Coloque o rádio dentro de uma sala e ligue-o, sintonizando uma estação ou colocando uma música. Posicione-se fora da sala e afastado da porta. Verifique que as ondas sonoras contornam o obstáculo da parede da sala, conseguindo chegar até o seu ouvido. Este fenômeno é chamado difração.

Análise e Explicação

Difração é a capacidade que uma onda tem de contornar obstáculos ou passar por fendas. Cada ponto atingido pela onda comporta-se como uma fonte de ondas secundárias que se propagam na direção e sentido da onda principal e com a mesma velocidade. Num instante posterior, a nova região do meio atingido pela onda é a superfície que tangencia essas ondas superficiais.

Ao passar por uma fenda, como na Fig.(2.29) a onda contorna os 2 obstáculos, espalhando-se. A difração de uma onda será tanto mais acentuada quanto maior for o seu comprimento de onda λ. De maneira semelhante, para uma onda com um certo comprimento de onda, a difração é tanto mais acentuada quanto menor for a largura da fenda. Se o comprimento de onda for muito menor do que a largura da fenda, a onda praticamente não se difrata e a sua direção de propagação não é alterada quando ela passa pela fenda.

Todas as ondas podem sofrer difração, mas esta só é facilmente perceptível quando o seu comprimento de onda for da mesma ordem de grandeza que o tamanho do obstáculo. As ondas sonoras, por exemplo, possuem grandes comprimentos de onda e podem contornar grandes obstáculos. Já a difração

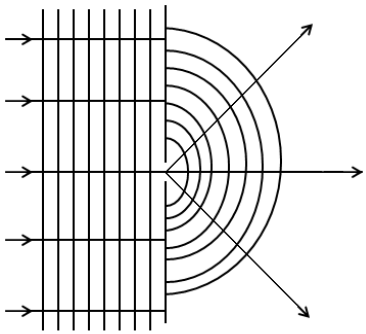

Figura 2.29: Difração de uma onda ao passar por uma fenda.

da luz é dificilmente percebida no dia-a-dia pois, tendo comprimento de onda muito pequeno, ela ocorre somente quando passa por fendas muito estreitas ou contorna obstáculos minúsculos.

2.28 Diapasões

Objetivo

Verificar a ressonância de ondas sonoras num par de diapasão.

Materiais Utilizados

2 diapasões com caixinhas de ressonância[12], 1 haste para golpear (com um disco de borracha de extremidade).

Montagem e Procedimento

Coloque os dois conjuntos (diapasões e caixinhas de ressonância) próximos, com as extremidades abertas de frente uma para a outra, como na Fig.(2.30). Golpeie um dos diapasões e observe que o outro também passa a vibrar.

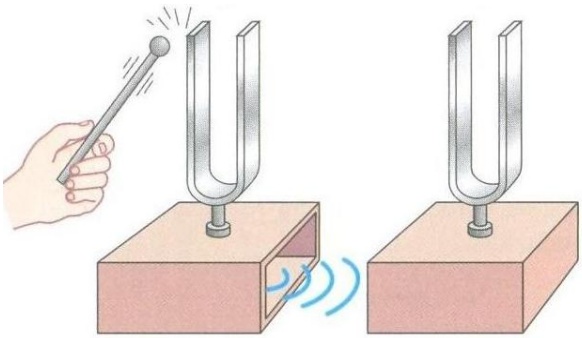

Figura 2.30: Diapasões próximos.

[12]Em umm modelo as caixinhas de ressonância para os diapasões possuem as seguintes dimensões: comprimento: $18cm$; largura: $9cm$; altura: $5cm$.

Análise e Explicação

A vibração de um dos diapasões provoca ondas sonoras[13] que se propagam e fazem vibrar o outro diapasão. Geralmente o som emitido é bastante fraco, somente podendo ser ouvido a uma pequena distância. Porém, se o diapasão for fixado numa caixa de ressonância seu som fica amplificado.

O que faz com que o som emitido pelo diapasão seja mais ou menos intenso, é a rapidez com que ele se dissipa. O som do diapasão enfraquece com o tempo, já que a energia de suas oscilações é transmitida para o ambiente. Estando acoplado na caixa de ressonância, essa dispersão ocorre com maior rapidez do que quando o diapasão está livre. Isso porque a transmissão da oscilação ocorre não apenas através dos ramos do diapasão como também pela caixa de ressonância. Dessa forma, em conjunto com a caixa ressonante o som emitido pelo diapasão fica mais forte, mas seu tempo de duração é menor.

[13] Ao ser excitado o diapasão vibra, emitindo uma onda sonora de frequência única, a qual costuma ser utilizada como padrão de frequência para a afinação de instrumentos.

2.29 Interferência no Diapasão

Objetivo

Observar a interferência no diapasão.

Materiais Utilizados

1 diapasão com caixinha de ressonância, 1 haste para golpear, 1 tubo de plástico ou vidro (que envolva um dos ramos do diapasão).

Montagem e Procedimento

Golpeie o diapasão com a haste de borracha e escute a intensidade sonora por ele gerada. Em seguida, envolva um dos ramos do diapasão com o tubo de plástico e golpeie o ramo livre. Observe agora como a intensidade do som aumenta consideravelmente.

Análise e Explicação

A superposição de duas ou mais ondas de mesma natureza provoca no local de superposição uma perturbação resultante, que é igual à soma das perturbações individuais de cada onda. Se as ondas interagentes estiverem em fase, ocorre uma interferência construtiva, e a onda resultante possui uma amplitude maior (Fig.2.31-a). Se as ondas estiverem fora de fase ocorre uma interferência destrutiva e a amplitude da onda resultante é menor, podendo até ser nula (Fig.2.31-b).

Neste experimento os ramos do diapasão oscilam em oposição de fase, fazendo com que ocorra uma interferência parcialmente destrutiva, tendo como resultante um som débil. Quando um dos ramos é envolvido pelo tubo, essa interferência deixa de existir e o diapasão passa a emitir um som mais forte.

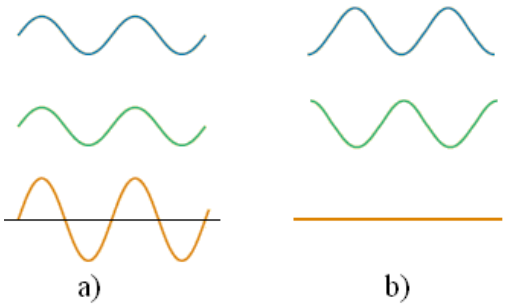

Figura 2.31: a- Interferência construtiva; b- Interferência destrutiva.

2.30 Interferência, Ressonância e Batimento

Objetivo

Estudar os fenômenos de interferência, ressonância e batimento de ondas sonoras com diapasões.

Materiais Utilizados

2 diapasões iguais (com caixas ressonantes), 2 prendedores metálicos (iguais), 1 haste para golpear o diapasão.

Montagem e Procedimento

Dê uma pancada numa haste de um dos diapasões, de modo que ele oscile, e ouça o efeito sonoro causado pela oscilação. Encoste o dedo e observe que ele deixa de oscilar e de emitir o som.

Disponhe os 2 diapasões, um do lado do outro, como na Fig.(2.30). Dê uma batida num deles (diapasão 1), colocando-o para oscilar. Perceba que o outro diapasão (diapasão 2) também passa a oscilar. Isso pode ser comprovado encostando o dedo no diapasão 2, sentindo a sua vibração, ou encostando no diapasão 1, impedindo-o de vibrar, e continuar ouvindo o som, o qual é proveniente do diapasão 2.

Coloque o prendedor num dos ramos de um dos diapasões e repita o procedimento anterior. Perceba que, colocando o diapasão 1 para oscilar, neste caso não ocorre o fenômeno da ressonância, pois o diapasão 2 não entra em oscilação.

Estando os 2 diapasões livres, coloque um deles e depois o outro para oscilar. Verifique como se comporta o som resultante por eles gerados.

Coloque os 2 prendedores, um em cada haste de cada diapasão, em alturas próximas. Dê uma batida em cada haste livre, de modo a colocar os 2 diapasões a vibrarem. Perceba agora um aumento e a diminuição periódica da intensidade do som.

Análise e Explicação

No primeiro caso ocorre o fenômeno da ressonância, onde há uma transferência de energia de um diapasão para o outro. Isso ocorre quando 2 sistemas oscilam com a mesma frequência.

A frequência de oscilação de um diapasão pode ser modificada alterando a sua distribuição de massa. Isso foi feito prendendo um prendedor na haste do diapasão.

Colocando os 2 diapasões para oscilarem, ocorre a interferência das ondas geradas por eles. Se a frequência dos diapasões forem próximas uma da outra, ocorre o fenômeno conhecido como batimento. Na Fig.(2.32-a) há um esquema da interferência de duas ondas de frequências próximas e na Fig.(2.32-b) a resultante dessa interferência. Os batimentos sonoros só podem ser percebidos por nosso aparelho auditivo se a frequência desses batimentos for menor que $7Hz$.

No batimento a onda resultante tem amplitude variável periodicamente, apresentando pontos de máxima e mínima intensidade. Chama-se batimento essa variação gradual e periódica de amplitude da onda resultante ou cada conjunto de vibração que vai de um mínimo até outro mínimo consecutivo.

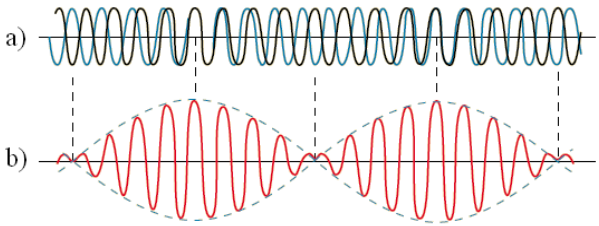

Figura 2.32: a- Interferência de duas ondas com frequências próximas; b- Onda resultante.

2.31 Frequência de um Diapasão

Objetivo

Determinar a frequência de vibração de um diapasão.

Materiais Utilizados

1 diapasão, 1 trena, 1 balança de precisão, 1 roldana, 1 martelo (pequeno) de borracha, fio de náilon, 1 porta pesos, diversas massas.

Montagem e Procedimento

Monte o conjunto de acordo com o esquema da Fig.(2.33). Fixe o diapasão horizontalmente num suporte (o qual pode mover-se horizontalmente) e na extremidade de uma de suas hastes prenda o fio de náilon. Passe o fio de náilon pela roldana e na outra extremidade prenda o porta pesos.

Coloque no porta pesos uma certa massa e golpeie o diapasão com o martelo. Varie o comprimento do fio entre a roldana e o diapasão até verificar a formação das ondas estacionárias (Fig.2.34). Nesse momento estará ocorrendo a ressonância entre o diapasão e a corda vibrante.

Quando forma-se as ondas estacionárias meça com a trena o comprimento do fio (do diapasão até a roldana), e a massa suspensa no mesmo (porta pesos + massa) com o auxílio da balança de precisão. Determine a densidade linear do fio medindo o seu comprimento e a sua massa. Conhecendo esses dados

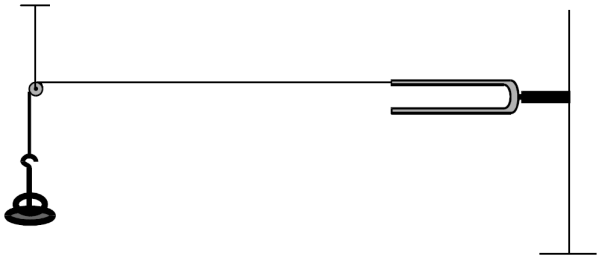

Figura 2.33: Fio tensionado preso no diapasão.

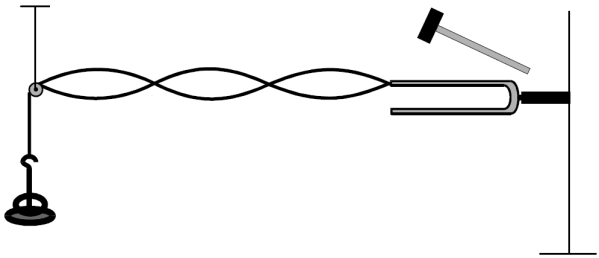

Figura 2.34: Formação de ondas estacionárias.

encontre a frequência de vibração do diapasão. Varie a massa suspensa no fio e obtenha novos dados.

Análise e Explicação

Quando um vibrador (como o diapasão) com uma frequência f própria é associado à uma corda, ocorre o fenômeno da ressonância, que é caracterizado pelo aparecimento de uma onda estacionária de amplitude considerável. Como a frequência do diapasão é fixa, ajusta-se o comprimento l da corda e a sua tração T (através da variação das massas suspensas) para que uma de suas frequências de ressonância coincida com a frequência do diapasão.

Uma corda de comprimento l, presa nas suas extremidades, apresenta

frequência f de vibração dada por:

$$f = \frac{nv}{2l} \tag{2.42}$$

com $n = 1, 2, 3, ...$, onde n é o número do harmônico (número de ventres formados) e v a velocidade de propagação da onda na corda.

A velocidade de propagação da onda na corda é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{2.43}$$

onde T é a tração nela exercida e μ é a densidade linear da corda. Sendo $T = Mg$, onde M é a massa suspensa e g a aceleração da gravidade, e $\mu = m/L$, onde m é a massa do fio e L o seu comprimento total, a Eq.(2.43) pode ser escrita como:

$$v = \sqrt{\frac{MgL}{m}} \tag{2.44}$$

Levando (2.44) em (2.42), vem que:

$$f = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{MgL}{m}} \tag{2.45}$$

2.32 Timbre Sonoro

Objetivo

Diferenciar sons de mesma intensidade e mesma frequência emitidos por instrumentos diferentes.

Materiais Utilizados

2 destes instrumentos (sendo 1 cada): violão, violino, teclado, flauta, etc., 1 pessoa (que saiba tocar o instrumento).

Montagem e Procedimento

Execute uma mesma nota num instrumento e no outro, de modo que elas tenham a mesma intensidade sonora (ou aproximada). Ouça os sons e perceba que você consegue distinguir o som de um instrumento de outro. Como isso é possível se ambos os sons têm a mesma frequência e a mesma intensidade?

Análise e Explicação

Nosso ouvido é capaz de distinguir dois sons de mesma frequência (altura) e mesma intensidade, desde que as formas das ondas sonoras correspondentes a estes sons sejam diferentes. A onda emitida por cada instrumento tem uma forma própria, a qual é chamada de timbre.

Na Fig.(2.35) tem-se as formas das ondas correspondentes aos sons oriundos de alguns instrumentos musicais.

A nota emitida por um instrumento, como um violão, por exemplo, é o resultado da vibração não só da corda tracionada, mas também de outras partes do violão (outra cordas, caixa de madeira, etc.), que vibram juntamente com ela. A onda sonora emitida por um instrumento (ou a própria voz humana), possui um timbre próprio.

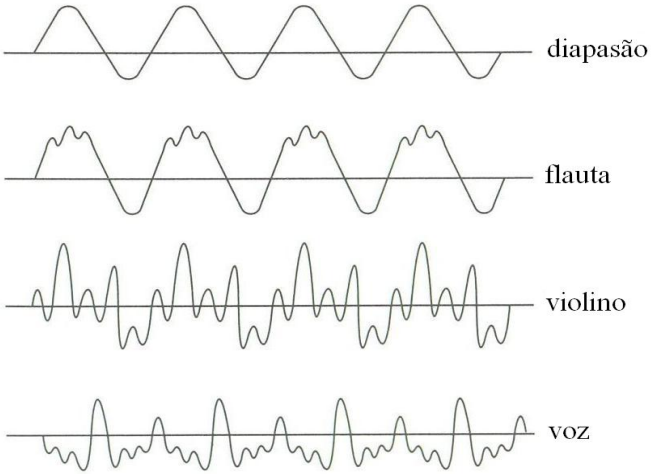

Figura 2.35: Formas das ondas correspondentes aos sons de alguns instrumentos.

2.33 Amplificação de uma Onda Sonora

Objetivo

Amplificar a captação de uma onda sonora.

Materiais Utilizados

1 rádio, cartolina, 1 suporte (de arame ou madeira), 1 microfone, microcomputador com software *Audacity*.

Montagem e Procedimento

Construa uma superfície parabólica (paraboloide) com uma cartolina, como mostrado na Fig.(2.36). Uma maneira fácil de fazer isso é usando a armação de um guarda-chuva ou sombrinha, com formato parabólico. Recubra a armação com cartolina.

Direcione o paraboloide para o rádio situado à uma certa distância (cerca de uns $10m$). Coloque um som no rádio e deixe o seu volume baixo. Posicione-

Figura 2.36: Superfície parabólica de cartolina.

se próximo ao paraboloide e coloque a orelha próxima ao seu foco (F) (Fig.2.37) para ouvir o som levemente amplificado.

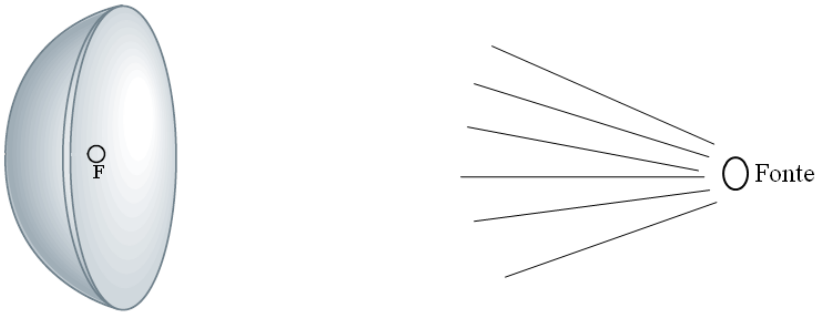

Figura 2.37: Som amplificado no paraboloide.

Uma opção mais aprimorada deste experimento é feita colocando o microfone no foco do paraboloide para captura e gravação do som e posterior análise num computador. Coloque o microfone voltado diretamente para a fonte sonora e depois disponhe-o no foco do parabolóide. Observe um aumento considerável da amplitude das ondas nesse último caso. Para analisar graficamente o som e perceber esse aumento de amplitude pode-se utilizar o software *Audacity*.

Análise e Explicação

Uma fonte sonora emite ondas em várias direções. Quando essas ondas incidem na superfície parabólica elas refletem para uma região próxima ao foco[14]. Um ouvinte ou um microfone posto neste local captará um som mais intenso.

Uma forma de tornar os resultados mais interessantes é utilizando 2 paraboloides. Produz-se o som no foco de um parabolóide e ouve-se no foco do outro. Paraboloides com $2m$ de diâmetro permitem que sons fracos sejam captados a cerca de $50m$ de distância com outro paraboloide.

As paredes dos paraboloides devem ser rígidas. Se as mesmas forem flexíveis, o som fará a sua estrutura vibrar, atenuando o som.

[14]Se todas as ondas incidissem no paraboloide paralelas ao seu eixo, elas refletiriam todas para o mesmo foco. Como todas as ondas incidentes não são paralelas ao eixo, elas não são refletidas para o foco pontual.

Capítulo 3

ÓPTICA

3.1 Meios Transparente, Translúcido e Opaco

Objetivo

Verificar o comportamento de um determinado meio quando à transmissão da luz.

Materiais Utilizados

Um ambiente iluminado, diferentes objetos (caderno, régua, plástico, vidro, etc.).

Montagem e Procedimento

Entre os diversos objetos disponíveis, perceba quais deles permitem a passagem total (ou quase total) da luz, quais deixam passar uma parte da luz, e quais não deixam passar a luz.

Análise e Explicação

Ao atravessar um meio, ou um corpo, a luz se comporta de diferentes maneiras. De acordo com esse comportamento pode-se classificar os meios físicos como transparentes, translúcidos ou opacos.

Um meio é considerado transparente quando a propagação da luz é regular e atravessa distâncias consideráveis em trajetórias bem definidas. Objetos colocados atras de meios transparentes, como uma lâmina de vidro, por exemplo, podem ser vistos com nitidez.

No meio translúcido a propagação da luz acontece de maneira desordenada e irregular, com intenso espalhamento aleatório. Objetos situados atrás de um meio translúcido, como um vidro fosco, por exemplo, não podem ser vistos com nitidez.

Quando um meio não permite que a luz se propague no seu interior, diz-se que ele é opaco. Depois de incidir num meio opaco a luz é parcialmente absorvida e parcialmente refletida por ele, sendo a parcela absorvida convertida em outras formas de energia. A opacidade ou não de um meio depende de vários fatores, como o tipo de radiação nele incidente. Neste experimento consideremos apenas a radiação visível.

3.2 Trajetória da Luz

Objetivo

Visualizar a trajetória de um feixe de luz.

Materiais Utilizados

1 lanterna (com feixe de luz colimado[1]), pó de giz, 1 anteparo (1 parede).

Montagem e Procedimento

Fixe a lanterna com o feixe de luz colimado, de modo a incidi-lo sobre a parede. Se possível, escureça o ambiente. Nessa situação observe a luz que sai da lanterna e é projetada na parede. Perceba que não é possível visualizar a trajetória que ela segue, desde que sai da lanterna até atingir a parede.

Em seguida espalhe um pouco de pó de giz na sala, de modo a formar uma nuvem de pó na região na qual existe o feixe de luz. Observe que, quando o pó cruza o feixe de luz, este torna-se visível, sendo possível ver a sua trajetória retilínea.

Análise e Explicação

Apesar de inicialmente o feixe de luz estar cruzando a sala, você não o vê porque nenhum raio de luz atinge diretamente os seus olhos. Observa-se o feixe de luz somente quando ele incide nas partículas do pó de giz e é refletido, atingindo o olho do observador. As partículas de giz espalham (difundem) a luz em todas as direções.

[1] Pode-se gerar feixes colimados de luz com uma lanterna ou uma lâmpada comum. Na lanterna pode-se colocar na sua frente um papel preto, colado com fita adesiva, com um orifício (do tamanho que achar conveniente). Da mesma forma, pode-se fazer uma fenda para que a lanterna produza um feixe de luz em forma de lâmina. Para gerar feixes paralelos de luz basta adaptar na frente da lanterna um papel ou tubo com 3 ou mais orifícios finos alinhados. Se dispuser de uma lâmpada, pode colocá-la dentro de uma caixa ou tubo e gerar feixes de luz da mesma forma que com a lanterna.

3.3 Independência dos Raios de Luz

Objetivo

Verificar o princípio da independência dos raios de luz.

Materiais Utilizados

2 lanternas (ou outras fontes luminosas, com feixes colimados).

Montagem e Procedimento

Num ambiente escurecido oriente os feixes de luz das lanternas, de modo que eles se cruzem, como mostra o esquema da Fig.(3.1).

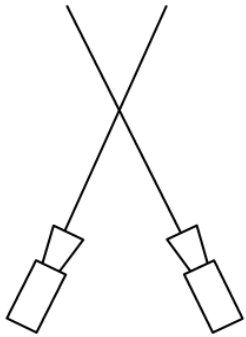

Figura 3.1: Feixes de luz cruzados.

Observe que cada feixe de luz segue o seu caminho como se não houvesse o cruzamento.

Análise e Explicação

Neste experimento foi verificado o principio da independência dos raios de luz, o qual diz que, quando ocorre cruzamento de 2 ou mais raios de luz, cada um deles continua sua propagação, independentemente da presença do(s) outro(s).

3.4 Sombra e Penumbra

Objetivo

Estudar a formação de sombra e de penumbra.

Materiais Utilizados

1 lanterna (ou outra fonte luminosa), 1 disco de papelão, um anteparo (uma parede)

Montagem e Procedimento

Focalize o feixe de luz oriundo da fonte no anteparo e no meio do feixe coloque o disco, numa distância conveniente. Observe no anteparo a formação de uma região mais escura, denominada sombra, e de uma região mais clara, chamada penumbra, como mostra o esquema da Fig.(3.2).

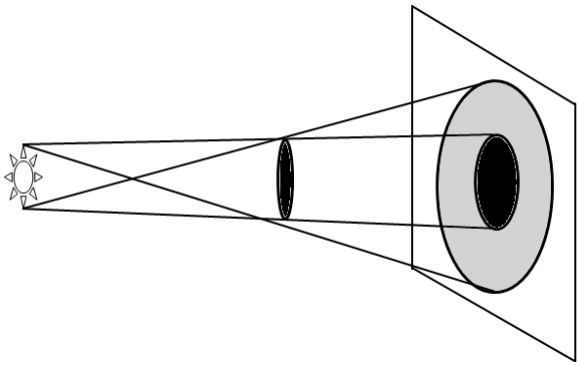

Figura 3.2: Formação de sombra e penumbra.

Análise e Explicação

Sendo que a propagação da luz é retilínea, ocorre a formação da sombra do disco no anteparo. Mas neste caso em que a fonte de luz é extensa e

não puntiforme, além da região de sombra há a região de penumbra, onde a iluminação é parcial, já que está recebendo luz de uma parte da fonte. Na região de penumbra a iluminação varia desde um mínimo até a iluminação plena.

3.5 Atração entre Sombras

Objetivo

Verificar o fenômeno da atração entre sombras.

Materiais Utilizados

1 lâmpada elétrica, 1 parede.

Montagem e Procedimento

Em uma sala escura coloque a lâmpada ligada. Próximo à uma parede coloque 2 objetos próximos, como por exemplo, suas mãos, e observe as sombras formadas na parede. Aproxime um objeto do outro e perceba que, quando bem próximos, as sombras projetadas na parede se atraem na região de maior proximidade entre elas.

Análise e Explicação

Este fenômeno, conhecido como atração de sombras, ocorre devido à existência de uma região de penumbra, que é decorrente da iluminação de um objeto opaco por uma fonte luminosa extensa, como mostrada no Exp.(3.4). A atração entre as sombras ocorre devido à interseção das regiões de penumbra, o que acaba gerando uma sombra. Quando duas sombras se aproximam, aquela que se encontra mais próxima do objeto que lhe corresponde será deformada (contraída) pela sombra do objeto mais distante.

3.6 Determinação de Alturas

Objetivo

Determinar a altura de uma estaca através da sua sombra e comprimento e da sombra de outra estaca.

Materiais Utilizados

2 estacas (de comprimentos diferentes), 1 trena, luz do sol (ou 1 lanterna).

Montagem e Procedimento

Num ambiente iluminado pelo sol ou por uma outra fonte luminosa, finque no chão as duas estacas (ou equilibre-as verticalmente), de modo que elas fiquem próximas[2] e exibam sombras. Com a trena meça a altura da estaca menor, bem como o comprimento das sombras produzidas pelas estacas.

Com esses dados determine a altura da estaca maior usando o conceito de semelhança de triângulos.

Análise e Explicação

A propagação em linha reta da luz faz com que seja produzido sombras nas estacas, como mostra o esquema da Fig.(3.3). A estaca 1, de altura H gera um sombra de comprimento D, enquanto a estaca 2, de altura h, produz uma sombra de comprimento d.

Por semelhança de triângulos[3] tem-se que:

$$\frac{H}{D} = \frac{h}{d}$$

Conhecendo os valores de D, h e d encontra-se a altura H por:

$$H = \frac{Dh}{d}$$

[2]Uma não deve ficar na sombra da outra, para facilitar as medidas.

[3]Dois triângulos são semelhantes quando os lados correspondentes tem medidas proporcionais e os ângulos correspondentes são iguais.

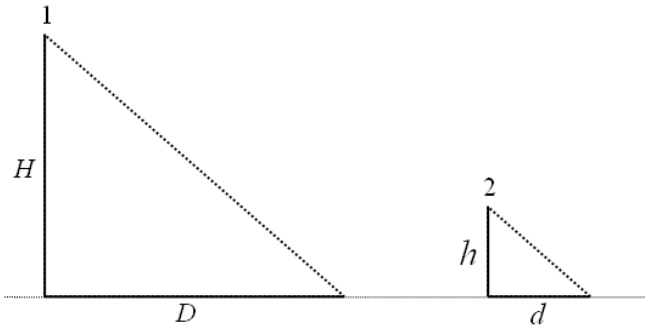

Figura 3.3: Sombras de estacas.

3.7 Câmara Escura

Objetivos

Construir uma câmara escura de orifício e constatar a propagação retilínea da luz.

Materiais Utilizados

Papel vegetal, papel preto (ou pintado de preto), fita adesiva, 1 tesoura, 1 agulha, 1 caixa de sapatos, 1 vela.

Montagem e Procedimento

Abra a caixa de sapatos com a tesoura e forre-a com papel preto (ela pode também ser pintada de preto). Corte uma das faces da caixa e feche-a com papel vegetal. Na outra face faça um orifício com a agulha. O orifício deve ser bem pequeno. A Fig.(3.4) representa um esquema de uma câmara escura[4].

Num ambiente bem escuro coloque a vela acesa próximo ao orifício da caixa. Você verá a imagem da vela projetada na parede de papel vegetal, mas

[4]Pode-se também fazer a câmara com uma lata de leite em pó, furando o fundo com um prego, de modo a produzir um orifício. Neste caso deve-se colocar papel vegetal na tampa da lata.

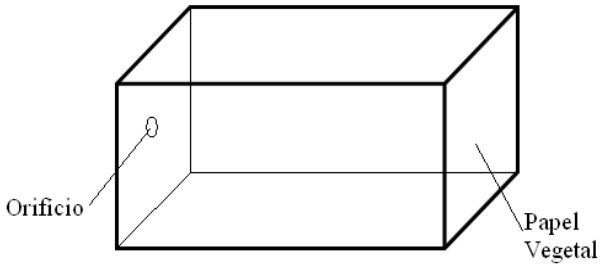

Figura 3.4: Câmara escura.

só que invertida.

Para não ter a necessidade de estar em ambientes escurecidos e usar somente objetos luminosos, pode-se fazer uma adaptação na caixa. Acopla-se uma outra caixa de sapatos, com uma das faces retiradas, na câmara escura (Fig.3.5). Um orifício maior é feito na outra face, o qual servirá como janela de visualização de imagens que serão formadas no papel vegetal. Essa câmara de proteção facilita a visualização das imagens de objetos colocados diante do orifício de câmara escura.

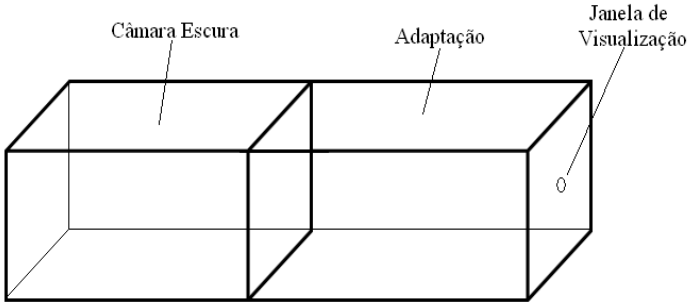

Figura 3.5: Câmara escura com câmara de proteção.

As imagens produzidas geralmente são de fraca intensidade, muitas vezes nem chegando a ser visíveis. Por isso é importante que os objetos projetados

na câmera sejam bem iluminados ou mesmo luminosos, como a vela utilizada neste experimento.

Análise e Explicação

No século XV Leonardo da Vinci descreveu detalhadamente a utilização de uma câmara escura. Em 1620 Johannes Kepler utilizou uma câmara escura de orifício para fazer desenhos topográficos. Cerca de 300 anos antes de Cristo Aristóteles já havia descrito uma experiência em que ele observa a imagem do sol produzida pela passagem da luz por um pequeno orifício de uma folha de uma planta.

Ao longo do tempo as técnicas de produção e obtenção de imagens com uma câmara escura foram aperfeiçoadas, o que acabou resultando nas modernas câmeras fotográficas.

A câmara escura de orifício funciona em decorrência de a luz se propagar em linha reta. Por isso é que, os raios de luz, ao passarem pelo orifício, vão projetar no anteparo (papel vegetal) uma imagem invertida do objeto, como esquematizado na Fig.(3.6).

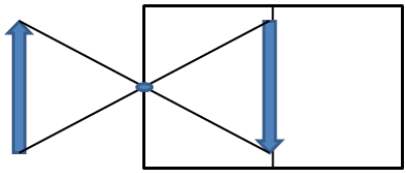

Figura 3.6: Imagem invertida na câmara escura.

Considerando o a altura do objeto, i a altura da imagem, p a distância entre o objeto e o orifício da câmara e p' a profundidade da câmara, por semelhança de triângulos tem-se:

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}$$

A imagem observada será tanto maior quanto mais próximo estiver o objeto e será tanto mais nítida quanto menor for o orifício da câmara.

3.8 Reflexão da Luz

Objetivo

Verificar o fenômeno de reflexão da luz.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 espelho plano, 1 folha de papel branco, 1 transferidor, 1 lápis.

Montagem e Procedimento

Coloque o espelho verticalmente sobre a folha de papel, e esta sobre uma superfície plana. Posicione o laser de modo a fazer incidir a luz sobre o espelho, como representado na Fig.(3.7).

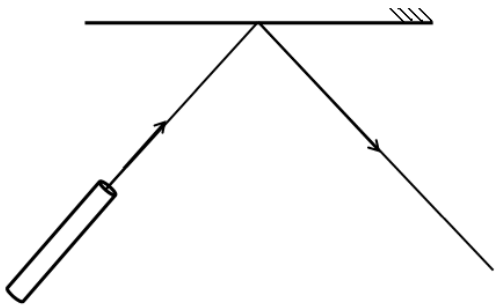

Figura 3.7: Luz do laser incidindo sobre o espelho.

Varie o ângulo de incidência da luz no espelho e observe a mudança do ângulo de reflexão. Risque no papel a trajetória do raio de luz incidente e o refletido e, com o transferidor, meça os ângulos de incidência e de reflexão.

Análise e Explicação

A reflexão ocorre quando um feixe de luz incide sobre uma superfície e retorna ao meio de origem. A reflexão regular acontece quando um feixe

de luz atinge uma superfície polida e é refletida de forma regular. A reflexão difusa ou difusão da luz ocorre quando um feixe de luz incide numa superfície e volta de forma irregular, propagando-se em todas as direções. É graça a esse fenômeno que conseguimos enxergar a forma dos objetos.

A descrição geométrica da reflexão está fundamentada em duas leis:

- O raio incidente, a reta normal e o raio refletido estão no mesmo plano;
- O ângulo de incidência (i) é igual ao ângulo de reflexão (r) (Fig.3.8):

$$i = r$$

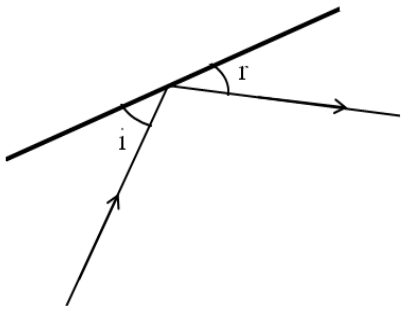

Figura 3.8: Ângulo de incidência e ângulo de reflexão.

3.9 Formação de Imagens no Espelho Plano

Objetivo

Estudar a formação de imagens num espelho plano.

Materiais Utilizados

2 objetos quaisquer (iguais), 1 espelho plano, 1 trena.

Montagem e Procedimento

Coloque um dos objetos na frente do espelho. Em seguida posicione o outro objeto atrás do espelho, à uma distância igual ao do primeiro objeto ao espelho, numa linha reta, de modo que o espelho fique perpendicular a essa linha, como representado na Fig.(3.9).

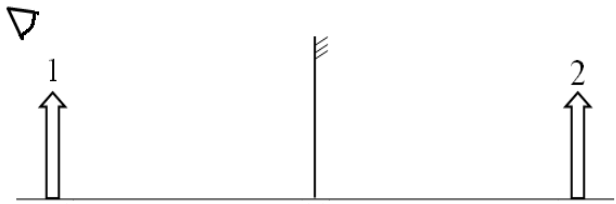

Figura 3.9: Espelho plano situado entre dois objetos.

Agora olhe a imagem do objeto 1 e o objeto 2 e perceba que eles parecem estar no mesmo local.

Análise e Explicação

A luz emitida por um objeto (ou simplesmente refletida por ele) e refletida em um espelho plano chega ao observador como se estivesse vindo do ponto de encontro dos prolongamentos dos raios refletidos. Nesse ponto o observador vê uma imagem virtual do objeto.

No esquema da Fig.(3.10) considere um objeto luminoso puntiforme localizado no ponto O. A luz emitida por esse objeto incide no espelho e é refletida, atingindo os olhos do observador (aqui considera-se apenas um único raio).

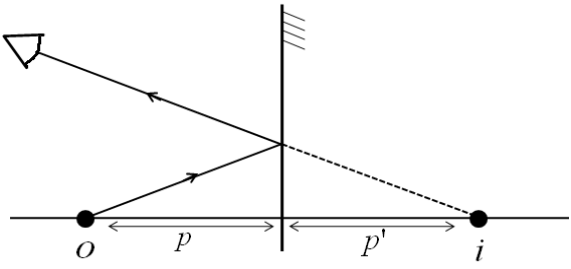

Figura 3.10: Imagem de um objeto num espelho plano.

Usando as leis da reflexão e traçando um prolongamento desse raio refletido, verifica-se que ele passa pelo ponto i. Para o observador é como se a imagem estivesse sendo emitida do ponto i, localizado atrás do espelho, sendo uma imagem virtual. Por questões de simetria, a distância do objeto ao espelho (p) é igual à distância da imagem ao espelho (p'):

$$p = p'$$

3.10 A Chama que Não Queima

Objetivo

Montar um experimento em que a chama de uma vela parece não queimar um papel.

Materiais Utilizados

2 velas, 1 lâmina de vidro transparente, fósforo, 1 régua, 1 folha de papel.

Montagem e Procedimento

Coloque uma vela em cada lado da lâmina de vidro, à uma mesma distância da lâmina ($p = p'$), estando esta disposta na vertical. Acenda a vela 1, olhe o conjunto do lado A do espelho e tenha a sensação que ambas as velas estão acesas. Em seguida coloque uma folha de papel sobre a vela 2. Olhando de A veja que a chama da vela não está queimando o papel (Fig.3.11).

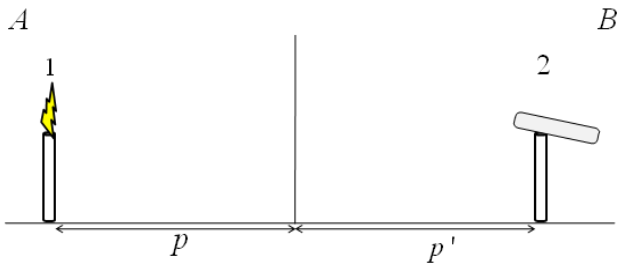

Figura 3.11: Chama que não queima.

Análise e Explicação

A chama da vela não queima o papel porque, na verdade, ela é apenas uma imagem. A lâmina de vidro funciona parcialmente como um espelho plano, pois reflete parcialmente a luz. A chama da vela 2 é apenas a imagem da chama da vela 1.

3.11 Multiplicação de Imagens

Objetivo

Verificar a multiplicação de imagens através da associação de espelhos planos.

Materiais Utilizados

2 espelhos planos, 1 objeto qualquer.

Montagem e Procedimento

Encoste os 2 espelhos pelas suas arestas de modo que formem um ângulo. Coloque um objeto qualquer diante dos espelhos. Varie o ângulo de abertura dos espelhos e acompanhe o número de imagens formadas (Fig.3.12).

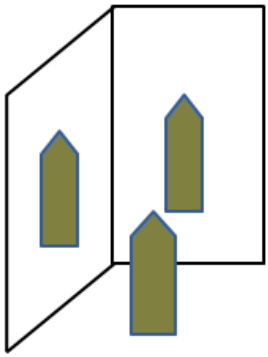

Figura 3.12: Associação de espelhos planos e multiplicação de imagens.

Análise e Explicação

Dois espelhos planos podem ser associados defrontando-se suas superfícies refletoras, formando um ângulo α entre eles, com $0° \leq \alpha \leq 180°$.

Considere os espelhos 1 e 2, perpendiculares entre si ($\alpha = 90°$), e um objeto O colocado diante dos espelhos. Veja um esquema da construção das imagens na Fig.(3.13).

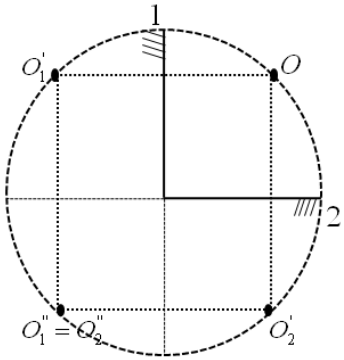

Figura 3.13: Formação de imagens em 2 espelhos planos dispostos perpendicularmente entre si.

O objeto O forma a imagem O'_1 no espelho 1 e a imagem O'_2 no espelho 2. A imagem O'_1 comporta-se como um objeto em relação ao espelho 2 e forma a imagem O''_2. A imagem O'_2 também comporta-se como um objeto em relação ao espelho 1 e forma a imagem O''_1. As imagens O''_2 e O''_1 são coincidentes, sendo formadas no mesmo ponto, na região que fica atrás dos espelhos, e que não gera novas imagens. Essa região corresponde ao ângulo morto da associação e as imagens aí formadas são chamadas de estéreis.

A diminuição do ângulo de abertura entre os 2 espelhos faz aumentar o número de imagens formadas. Mais precisamente, o número n de imagens de um objeto fornecidas por 2 espelhos angulares é dada pela expressão:

$$n = \frac{360}{\alpha} - 1$$

onde α é o ângulo (em graus) entre os 2 espelhos. Por exemplo, quando os dois espelhos formam um ângulo reto ($\alpha = 90°$), há a formação de 3 imagens.

3.12 Caleidoscópio

Objetivos

Construir, observar e estudar a formação de imagens em um caleidoscópio.

Materiais Utilizados

1 cano de PVC ($6cm$ de diâmetro), 3 espelhos planos retangulares (iguais, que encaixem dentro do tubo de PVC), fita adesiva, papel, papel vegetal, objetos plástico pequenos, plástico fino.

Montagem e Procedimento

Coloque o 3 espelhos dentro do tubo de PVC[5], dispostos na forma de um prisma triangular, com as faces refletoras voltadas para dentro, formando 3 ângulos iguais. Um esquema do arranjo dos espelhos está na Fig.(3.14).

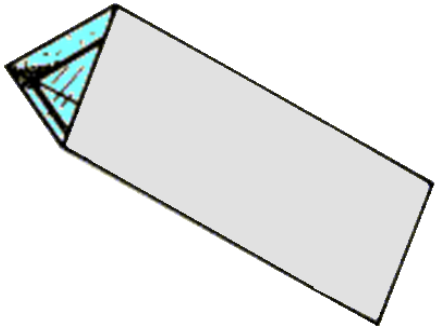

Figura 3.14: Estrutura interna do caleidoscópio.

Feche um dos lados do tubo com papel vegetal, que é para permitir a entrada de luz no interior do caleidoscópio. Coloque os objetos plásticos (ou pedacinhos coloridos de cartolina) no meio entre os vidros e feche o outro

[5]Não é absolutamente necessário o tubo de PVC. Os espelhos podem ser unidos firmemente apenas com uma fita adesiva.

lado do tubo com o plástico e depois com uma superfície de papel. Nesta última superfície faça um orifício no centro do tubo, que é para visualizar os objetos no interior do conjunto de espelhos. O plástico fino impedirá que os objetos plásticos saiam do caleidoscópio quando este for disposto na vertical.

Após construído o caleidoscópio, segure-o na horizontal contra a luz, olhe pelo orifício de visualização e vá girando-o lentamente. Observe a formação de diferentes padrões de imagens gerados pelas objetos plásticos localizados no interior.

Análise e Explicação

O funcionamento do caleidoscópio está baseado no efeito causado pelos espelhos angulares que formam suas paredes internas. Entre as faces refletoras desses espelhos ocorrem múltiplas reflexões, as quais são observadas por um visor e dão a impressão de existir uma infinidade de arranjos de objetos ou de figuras no seu interior. Girando o caleidoscópio a estrutura das imagens vai se alterando.

3.13 Túnel do Tempo

Objetivos

Construir o experimento denominado túnel do tempo e verificar a formação de um grande número de imagens na associação de 2 espelhos planos.

Materiais Utilizados

2 espelhos planos (com suportes para mantê-los na vertical), 1 objeto qualquer.

Montagem e Procedimento

Obtenha um número grande de imagens (número esse que tende ao infinito), colocando os 2 espelhos planos paralelos de frente um para o outro, com o objeto no meio. As imagens vistas são mais interessantes e bem visíveis se for feito um orifício na parte de trás do centro de um dos espelhos (raspa-se a camada espelhada, mas isso não é obrigatoriamente necessário) (Fig.3.15).

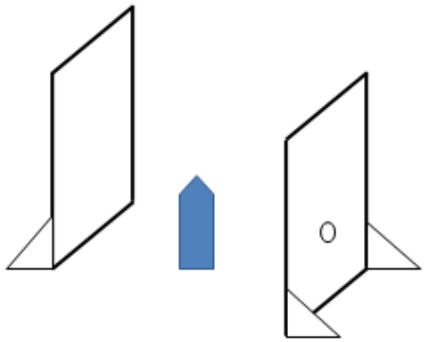

Figura 3.15: Experimento túnel do tempo.

Análise e Explicação

Quando 2 espelhos planos forem dispostos paralelamente entre si, um objeto colocado entre suas superfícies refletoras produzirá infinitas imagens. Isso ocorre porque a imagem do objeto projetada num espelho comporta-se como objeto para o outro espelho, ocorrendo uma sucessiva formação de imagens.

As infinitas imagens que teoricamente são geradas não serão totalmente observáveis em razão da gradual diminuição sofrida pelo ângulo visual de observação à medida que o número de reflexões da luz no sistema vai aumentando. Além disso, essas reflexões sucessivas faz com que haja uma dissipação de energia, o que torna os raios luminosos mais fracos.

3.14 Sistema Refletor Inversor

Objetivo

Montar um sistema refletor inversor de imagens com espelhos planos.

Materiais Utilizados

3 espelhos planos (de formato retangular, com cerca de $20cm \times 10cm$ cada), 1 pedaço de papelão (para firmar os espelhos), 1 tesoura.

Montagem e Procedimento

Faça fendas no papelão, de modo a encaixar os espelhos, como no esquema da Fig.(3.16), onde o mesmo é visto de cima. É importante testar antes o ângulo de abertura α entre os espelhos 1 e 2. O papelão deve ficar na vertical, de modo que o espelho 3 fique paralelo à horizontal e os espelhos 1 e 2 inclinados em relação à horizontal.

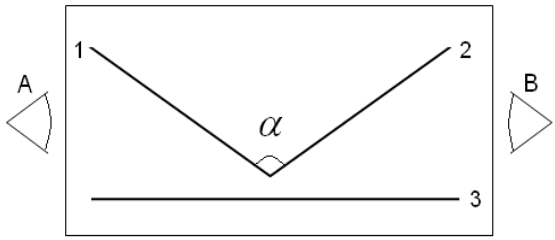

Figura 3.16: Sistema refletor inversor.

Com o auxílio de um colega, coloquem-se um de cada lado dos espelhos, de modo a formarem os observadores A e B. Perceba que, cada observador vê o outro de uma maneira invertida. Pode-se também substituir um dos observadores por algum objeto.

Análise e Explicação

Os raios de luz provenientes de um observador (ou objeto) não atingem diretamente o outro observador, mas sim, sofrem 3 reflexões sucessivas, uma em cada espelho.

Considere o esquema de espelhos da Fig.(3.17), onde existe o observador A e o objeto B. A imagem do objeto B é refletida no espelho 2, formando a imagem B_2. B_2 comporta-se como objeto, que dá origem a imagem B_3 no espelho 3. De maneira semelhante, forma-se a imagem B_1 no espelho 1 e finalmente a imagem B' visto pelo observador A.

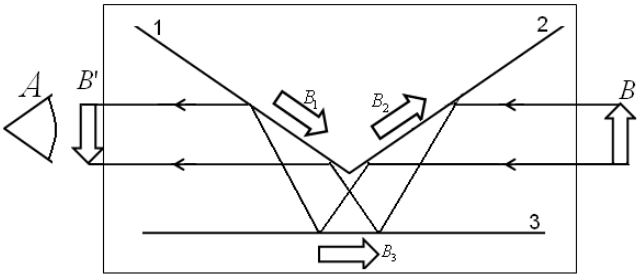

Figura 3.17: Formação de imagens no refletor inversor.

Os raios de luz vindos do objeto B cruzam-se entre si 3 vezes (nos espelhos 2, 3 e 1, respectivamente) antes de atingirem o olho do observador A. Por ser um número ímpar de vezes, a imagem formada é invertida.

3.15 Periscópio

Objetivos

Construir e estudar o funcionamento do periscópio.

Materiais Utilizados

2 espelhos quadrados planos, 1 tubo de PVC (de cerca de $6mm$ de diâmetro), 1 serrinha (de cortar ferro), 1 furadeira com broca (de diâmetro conveniente), fita adesiva.

Montagem e Procedimento

Construa o periscópio de acordo com o esquema da Fig.(3.18). Com a serrinha corte parcialmente o tubo PVC para encaixar os espelhos, sendo estes dispostos num ângulo de $45°$ com a direção longitudinal do tubo. Com a furadeira faça os 2 orifícios que servirá para a passagem da luz. Para firmar os espelhos prenda-os ao tubo com fita adesiva. Finalizada a construção, o periscópio está pronto para ser usado.

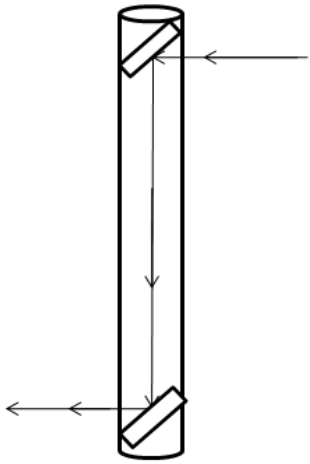

Figura 3.18: Estrutura do periscópio.

Análise e Explicação

Muito usado nos submarinos, os periscópios tem como objetivo possibilitar aos navegadores, submersos a poucos metros, a observação do que ocorre acima da superfície da água. O funcionamento de um periscópio, independente da maior ou menor sofisticação tecnológica com a qual é construído, está ligado ao fenômeno da reflexão da luz por espelhos.

Os raios de luz vindos de um objeto refletem nos espelhos e atingem o observador, descrevendo um trajeto na forma de um Z. O observador enxerga a imagem como se ela estivesse ao nível dos seus olhos.

Os periscópios também podem utilizar prismas no lugar dos espelhos, pois neles pode ocorrer o fenômeno da reflexão total. Em cada prisma o raio atinge a face maior em um ângulo superior ao ângulo-limite, sendo totalmente refletido. Para aumentar o campo de visão os periscópios também usam lentes.

3.16 Amplificação de uma Deformação Mecânica

Objetivo

Visualizar uma deformação mecânica através de um feixe de luz.

Materiais Utilizados

2 espelhos planos (pequenos), 1 ponteira laser (ou uma fonte de luz comum, desde que seja colimada), 1 tábua fina (ou um pedaço de PVC, ou qualquer outro material que se deforme), 2 blocos, 2 suportes (para os espelhos), 1 anteparo (pode ser uma parede), 1 objeto pesado.

Montagem e Procedimento

Suspenda a tábua por 2 blocos, e sobre ela coloque os 2 espelhos fixados nos seus suportes, um de frente para o outro. Nas proximidades coloque a ponteira laser (bem fixa), de modo que o feixe incida no espelho 1, reflita e incida no espelho 2, e finalmente atinja o anteparo. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(3.19).

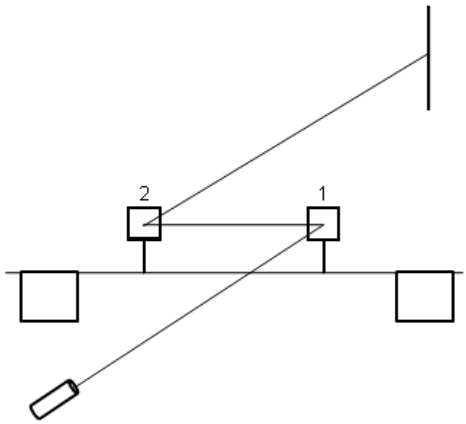

Figura 3.19: Feixe de laser incidindo sobre os espelhos.

Em seguida coloque o objeto pesado sobre a tábua, entre os 2 espelhos, e observe a mudança da posição do feixe de luz incidente no anteparo.

Análise e Explicação

Quando coloca-se o objeto sobre a superfície na qual os espelhos estão apoiados, ocorre uma deformação da mesma, o que faz com que os espelhos mudem suas orientações. Essa mudança de orientação faz variar os ângulos de incidência e reflexão da luz, o que vai mudar a posição de incidência do feixe no anteparo.

Os processos de detecção de deformações ou mudanças de orientações por meios ópticos são muito importantes, principalmente devido à capacidade de detectar variações muito pequenas.

3.17 Espelhos Côncavo e Convexo

Objetivos

Construir um espelho côncavo e um espelho convexo e observar o comportamento de raios de luz neles incidentes.

Materiais Utilizados

1 lanterna, 1 pente, 1 colher grande ou concha metálica (bem polida).

Montagem e Procedimento

Uma forma fácil de obter os espelhos esféricos é utilizando uma colher grande, desde que comporte-se como um material bem refletor. A parte interna funciona como um espelho côncavo e a parte externa como um espelho convexo.

Faça incidir a luz da lanterna nos espelhos, fazendo-a passar primeiramente pelos dentes do pente, de modo a facilitar a visualização dos raios. Perceba que, no espelho convexo os raios são refletidos e divergem (Fig.3.20-a). No espelho côncavo os raios refletidos acabam convergindo (Fig.3.20-b).

Análise e Explicação

Um espelho esférico é aquele cuja superfície refletora é uma calota esférica. Se superfície refletora for a face interna da calota, tem-se um espelho côncavo. Agora, se for a parte externa, tem-se um espelho convexo.

Um raio de luz incidente sobre um espelho esférico obedece às mesmas leis da reflexão dos espelhos planos. Normalmente os espelhos esféricos não fornecem imagens nítidas, causando distorções das imagens. Para um espelho esférico produzir imagens nítidas, deve-se obedecer as condições de nitidez de Gauss:

- o ângulo de abertura α do espelho deve ser pequeno ($\alpha \leq 10°$);

- os raios incidentes devem ser paralelos ou pouco inclinados em relação ao eixo principal;

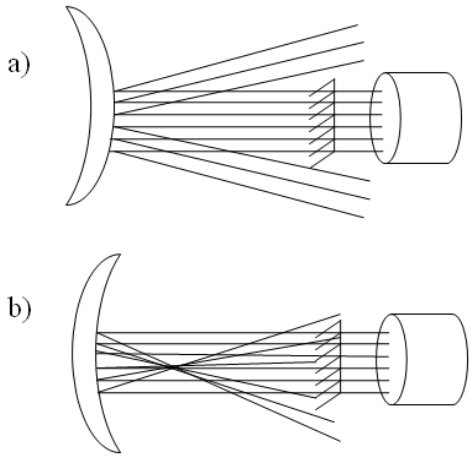

Figura 3.20: Incidência e reflexão de luz num espelho: a- Convexo; b- Côncavo.

Os principais elementos geométricos num espelho esférico estão representados na Fig.(3.21) e são: C: centro de curvatura, V: vértice, R: raio de curvatura, α: ângulo de abertura, F: foco. A distância de V até F é metade da distância de V até C.

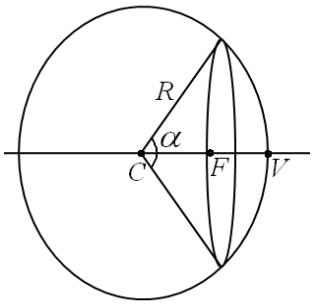

Figura 3.21: Elementos geométricos de um espelho esférico.

Imagine um feixe de luz, paralelo ao eixo principal, incidindo sobre um espelho esférico. Se o espelho for côncavo, todos os raios refletidos convergem sobre o foco F, como mostra a Fig.(3.22-a). No espelho convexo todos

os raios refletidos divergem, sendo que os seus prolongamentos tem o ponto comum F (Fig.3.22-b).

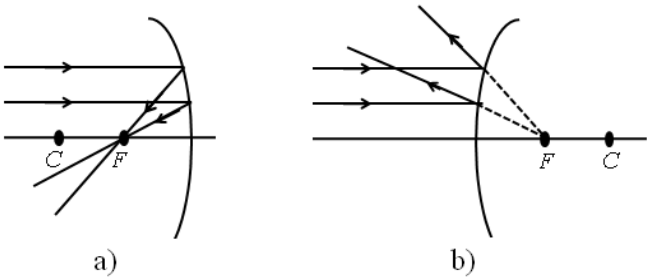

Figura 3.22: Feixes de luz incidindo num: a- Espelho côncavo; b- Espelho convexo.

3.18 Imagens no Espelho Côncavo

Objetivo

Verificar a formação de imagens num espelho côncavo.

Materiais Utilizados

1 espelho esférico côncavo (pode-se utilizar uma colher metálica, como no Exp.(3.17)).

Montagem e Procedimento

Com a sua mão segure o espelho à uma distância máxima dos seus olhos. Veja a imagem do seu rosto no espelho. Lentamente, vá aproximando o espelho dos seus olhos e veja como se comporta a sua imagem[6].

Perceba que, inicialmente você vê o seu rosto pequeno e invertido. À medida que você aproxima o espelho, a sua imagem vai aumentando, chegando num ponto em que ela some e depois volta a aparecer direita e maior.

Análise e Explicação

Dependendo da posição do objeto colocado à frente de um espelho esférico côncavo, ocorre a formação de diferentes tipos de imagens. Se o objeto (AB) estiver situado antes do centro de curvatura C do espelho, tem-se uma imagem ($A'B'$) real, invertida e menor. Uma imagem real é obtida pela intersecção efetiva dos próprios raios refletidos, ou seja, ela é formada na frente do espelho, como mostra o esquema da Fig.(3.23).

Quando o objeto for posicionado sobre C, forma-se uma imagem real, invertida e de mesma altura (igual), como pode-se ver no esquema da Fig.(3.24).

Se o objeto estiver localizado entre C e o foco principal F, a imagem formada é real, invertida e menor, como representada na Fig.(3.25).

Quando o objeto for colocado sobre F, não ocorre formação de imagens, ou diz-se que a imagem formada é imprópria. Aqui não ocorre a interseção dos raios refletidos ou de seus prolongamentos, porque eles são paralelos.

[6] Neste experimento o objeto é o próprio observador.

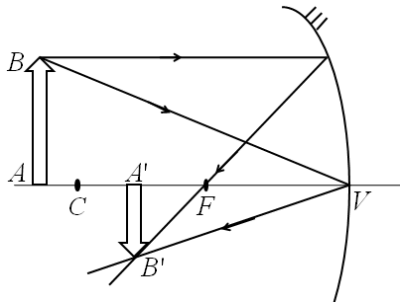

Figura 3.23: Objeto localizado antes de C.

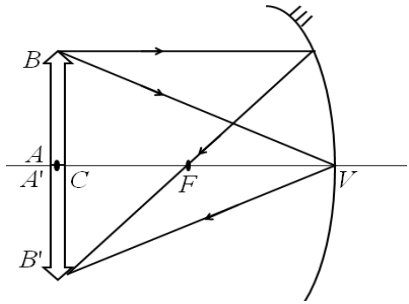

Figura 3.24: Objeto situado sobre C.

Diz-se que os raios paralelos convergem no infinito e a imagem se forma no infinito[7] (Fig.3.26).

Se o objeto for colocado entre F e o vértice do espelho V a imagem formada é virtual, direita e maior que o objeto, como mostra a Fig.(3.27).

Os espelhos côncavos possuem diversas aplicações. Por exemplo, o espelhinho utilizado pelos dentistas para observar a parte interna dos dentes do

[7]Como será visto adiante, a posição da imagem p' em relação ao espelho é dada pela relação:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

onde p é a distância do objeto ao espelho e f a distância focal do espelho. Se $p = f$, tem-se que $1/p' = 0$, ou $p' = 1/0$, o que não existe.

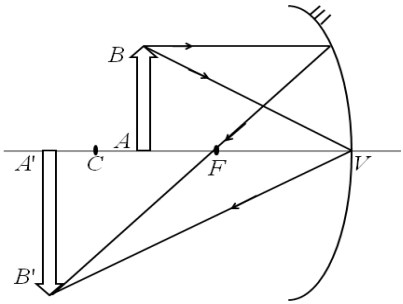

Figura 3.25: Objeto localizado entre C e F.

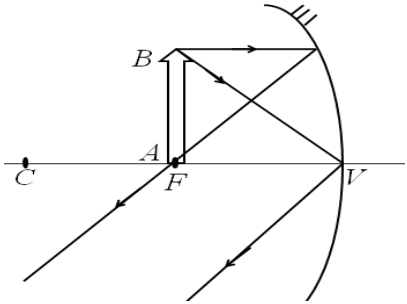

Figura 3.26: Objeto posicionado sobre F.

paciente é côncavo, e tem distância focal de cerca de $40mm$. Com isso o dente a ser examinado fica compreendido entre o foco e o vértice do espelho, fazendo com que seja produzida uma imagem virtual, direita e maior do dente.

Já nos espelhos côncavos encontrados em banheiros o raio de curvatura é da ordem de $1m$. A pessoa geralmente posiciona-se à uma distância menor de $1m$, por isso que enxerga-se maior e direita. Geralmente quando olhamos para um espelho côncavo a dimensão e a posição da imagem formada são um pouco diferentes das previstas teoricamente, pois o nosso olho é uma lente que conjuga imagens reais na nossa retina. A imagem conjugada pelo espelho é um objeto real para a lente do olho.

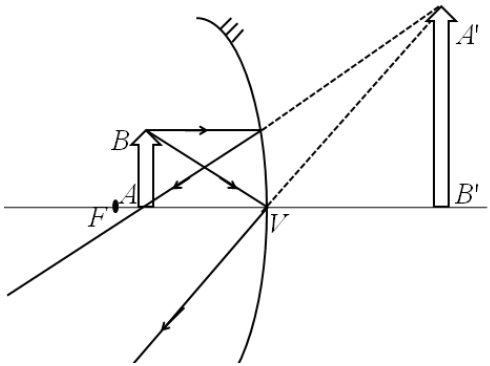

Figura 3.27: Objeto localizado entre F e V.

3.19 Imagens no Espelho Convexo

Objetivo

Verificar a formação de imagens no espelho convexo.

Materiais Utilizados

1 espelho esférico convexo (pode-se utilizar uma colher metálica, como no Exp.(3.17)).

Montagem e Procedimento

Repita o procedimento do Exp.(3.18), mas agora com um espelho esférico convexo. Observe que a imagem formada possui sempre a mesma forma.

Análise e Explicação

Num espelho convexo, qualquer que seja a posição do objeto diante do espelho, a imagem formada sempre será direita, virtual e menor que o do objeto.

A imagem é virtual porque é obtida pela interseção do prolongamento dos raios refletidos, ou seja, a imagem se forma atrás do espelho. Na Fig.(3.28)

há um esquema da construção geométrica da imagem $A'B'$ de um objeto AB diante de um espelho convexo.

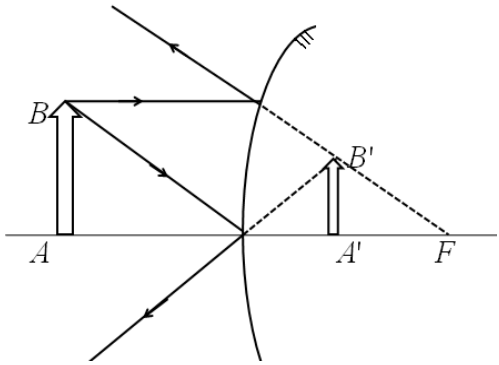

Figura 3.28: Formação de imagem num espelho convexo.

3.20 Distância Focal de um Espelho Esférico

Objetivo

Determinar a distância focal de um espelho esférico côncavo.

Materiais Utilizados

1 espelho esférico côncavo, 1 lanterna, 1 objeto, 1 anteparo.

Montagem e Procedimento

Coloque o espelho côncavo e o objeto alinhados com a fonte luminosa, como mostra o esquema da Fig.(3.29), a qual representa uma vista superior da montagem do experimento[8].

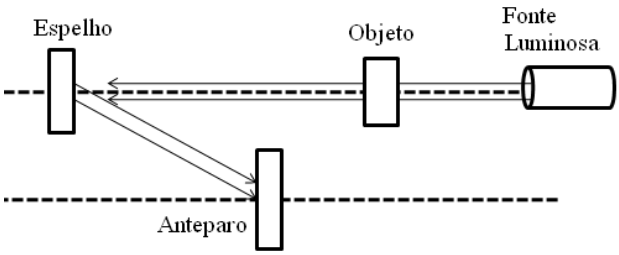

Figura 3.29: Esquema do experimento para determinação da distância focal.

Gire um pouco o espelho, de modo que a imagem do objeto seja projetada no anteparo. Desloque o espelho e o anteparo (na direção das linhas pontilhadas), de modo que a imagem do objeto fique nítida sobre o anteparo. Quando a imagem torna-se nítida meça os valores de p e p', os quais são, respectivamente, a distância entre o objeto e o espelho e a distância entre o espelho e o anteparo (imagem). Obtenha diversos valores de p e p', encontrando o valor da distância focal f para cada conjunto. Depois faça uma média dos valores de f.

[8] O objeto utilizado no experimento realizado pelo autor foi uma letra do alfabeto (letra F) colada num pedaço de vidro transparente, o qual se mantinha firme na vertical.

Análise e Explicação

Considere o esquema da Fig.(3.30), que mostra a formação da imagem de um objeto num espelho côncavo. AB é o objeto e $A'B'$ é a imagem formada, situados, respectivamente, a uma distância p e p' do vértice do espelho.

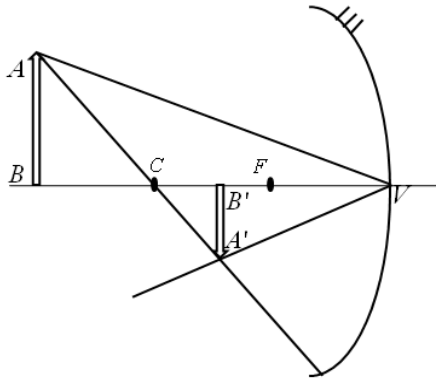

Figura 3.30: Objeto e imagem num espelho esférico côncavo.

Os triângulos ABV e $A'B'V'$ são semelhantes, de modo que pode-se escrever:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'V}{BV} \tag{3.1}$$

Sendo $BV = p$ e $B'V = p'$, escreve-se (3.1) como:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p} \tag{3.2}$$

Ainda analisando a Fig.(3.30) percebe-se que os triângulos ABC e $A'B'C$ são semelhantes, de modo que:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'C}{BC} \tag{3.3}$$

A distância $B'C$ pode ser escrita como $B'C = CV - B'V$, ou:

$$B'C = 2f - p' \tag{3.4}$$

e a distância BC como $BC = BV - CV$, ou:

$$BC = p - 2f \tag{3.5}$$

Levando (3.4) e (3.5) em (3.3), vem que:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{2f - p'}{p - 2f} \tag{3.6}$$

Igualando as Eqs.(3.2) e (3.6):

$$\frac{p'}{p} = \frac{2f - p'}{p - 2f}$$

obtem-se:

$$2pp' = 2fp' + 2fp \tag{3.7}$$

Dividindo (3.7) por $2fp'p$ encontra-se a equação dos espelhos esféricos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \tag{3.8}$$

a qual relaciona as distâncias do objeto e da imagem ao espelho e a distância focal deste. Quanto a questão de sinais: $p > 0$, pois o objeto é sempre real; $f > 0$ para espelhos côncavos e $f < 0$ para espelhos convexos; $p' > 0$ se a imagem for real e $f < 0$ se a imagem for virtual.

Sendo $AB = o$ a altura do objeto e $A'B' = i$ a altura da imagem, através da Eq.(3.2) e pela análise da Fig.(3.30), tem-se que a relação para o aumento linear transversal $A = i/o$ é:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

Quanto aos sinais tem-se: $o > 0$ para objeto situado acima do eixo principal e $o < 0$ para objeto situado abaixo do eixo principal; $i > 0$ para imagem acima do eixo principal e $i < 0$ para imagem abaixo do eixo principal. Daí resulta que $A > 0$ para imagem direita e $A < 0$ para imagem invertida.

Utilizando um espelho côncavo de distância focal $f = 11,0cm$ obteve-se os seguintes valores de p e p' (Tab.3.1). Tem-se também os valores de f correspondentes, os quais são calculados pela relação:

$$f = \frac{pp'}{p + p'} \tag{3.9}$$

Tabela 3.1: Valores de p, p' e f para um esférico côncavo.

$p(cm)$	$p'(cm)$	$f(cm)$
22,0	22,0	11,09
15,0	42,5	11,09
13,0	67,0	10,89
24,0	20,0	10,91
25,0	19,0	10,80
32,0	16,0	10,89
14,0	48,0	10,84
19,0	26,0	10,98
21,0	23,0	10,98
26,0	19,5	11,14
16,0	36,0	11,08

que é oriunda da Eq.(3.8).

Através desses dados obteve-se uma distância focal média de $f = 10,96cm$, ou $109,6mm$.

3.21 Projeção de Imagens por um Espelho Côncavo

Objetivo

Verificar a projeção de uma imagem real por um espelho esférico côncavo.

Materiais Utilizados

1 vela, 1 (ou mais) espelho côncavo, 1 espelho convexo, 1 anteparo branco, 3 suportes.

Montagem e Procedimento

Coloque a vela, o anteparo e o espelho côncavo presos em suportes, e disponha-os de modo que fiquem alinhados, como no esquema da Fig.(3.31). O espelho, a chama da vela e o anteparo devem estar numa mesma altura da superfície.

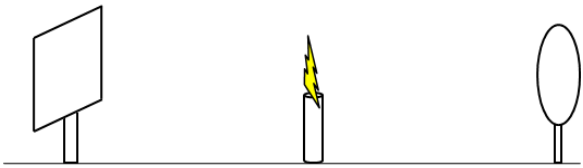

Figura 3.31: Anteparo, vela e espelho côncavo alinhados.

Acenda a vela e deixe o ambiente escurecido. Gire um pouco o espelho esférico para o lado e coloque o anteparo um pouco para o lado da linha reta que une o espelho e a vela, com na Fig.(3.32), de modo que a imagem da vela refletida no espelho incida no anteparo. Altere a distância entre eles, de modo a formar uma imagem nítida da chama da vela no anteparo. Se dispor, pode repetir o mesmo experimento utilizando outros espelhos côncavos.

Substitua o espelho côncavo pelo convexo e perceba que não é possível projetar a imagem da chama da vela no anteparo.

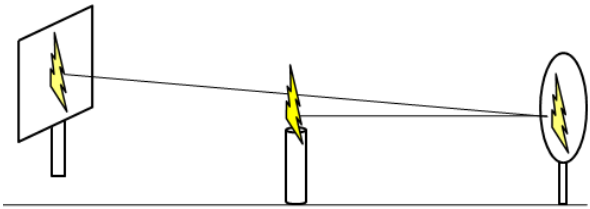

Figura 3.32: Projeção de imagem pelo espelho côncavo no anteparo.

Análise e Explicação

Quando um feixe de luz emitido por um objeto se reflete num espelho côncavo, de modo a convergir para um ponto, neste ponto teremos a formação de uma imagem real do objeto. Se colocarmos um anteparo nessa posição observaremos a imagem formada sobre ele. Isso ocorre porque nesse ponto realmente passam os raios refletidos. Num espelho convexo isso não ocorre porque ele sempre produz imagens virtuais.

3.22 Refração da Luz 1

Objetivo

Verificar o deslocamento aparente de um objeto devido a refração da luz.

Materiais Utilizados

1 mesa, 1 copo plástico pequeno, 1 moeda, 1 seringa descartável, água, 1 canudinho de refresco, fita adesiva, 1 garrafa PET de refrigerante de $600ml$ ou $1l$ (ou qualquer outro objeto que tenha a mesma finalidade).

Montagem e Procedimento

Fixe o copo de plástico na mesa com a fita e nele coloque um pouco de água. Em seguida coloque a moeda no copo. Fixe o canudinho na parte lateral superior da garrafa, de modo que, olhando-se por dentro dele, possa-se ver a moeda no fundo do copo com água, como representado na Fig.(3.34).

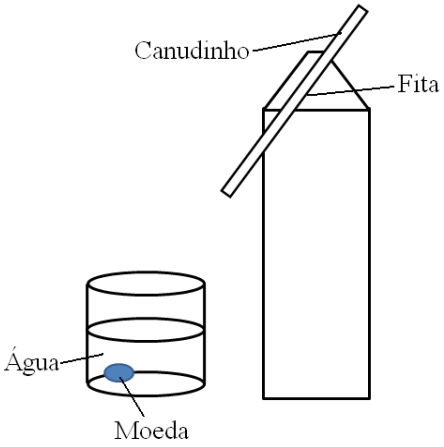

Figura 3.33: Olhando a moeda no fundo do copo com água pelo interior do canudinho.

Deixando todo o conjunto estático, retire a água do copo com a seringa,

tendo cuidado para não modificar a posição da moeda. Olhe novamente pelo interior do canudinho e perceba que não se enxerga mais a moeda.

Análise e Explicação

A moeda torna-se visível porque ela reflete a luz que nela incide. Devido a existência da água, essa luz refrata ao passar da água para o ar, mudando a sua direção de propagação. Alguns desses raios refratados passam pelo interior do canudinho e atingem o olho do observador (Fig.3.34-a).

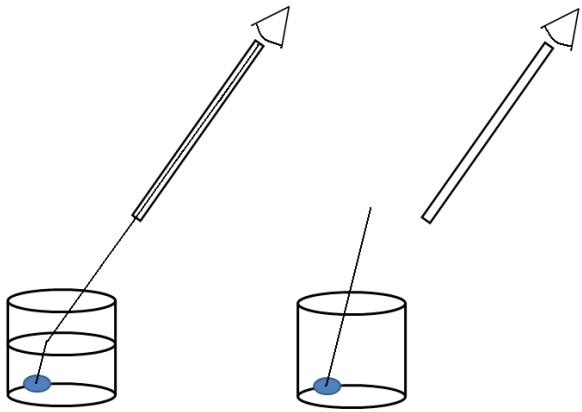

Figura 3.34: Raios de luz refletidos pela moeda: a- Passam pelo interior do canudinho; b- Não passam mais pelo interior do canudinho.

Retirando-se a água do copo, os raios de luz refletidos na moeda não sofrem mais refração, e propagam-se em direções diferentes à situação anterior, não passando mais pelo interior do canudinho (Fig.3.34-b).

Considere uma observação obliqua à superfície que separa os dois meios[9]. A Fig.(3.10) representa um objeto O que se encontra numa profundidade p, sendo visto numa profundidade menor p' devido à difração.

Sendo que o observador está no meio 1 com índice de refração n_1 e o objeto encontra-se no meio 2 com índice de refração n_2, relaciona-se a pro-

[9] O conjunto de dois meios transparentes e homogêneos separados por uma superfície plana é chamado diopto plano.

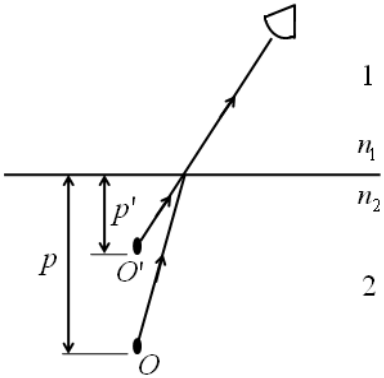

Figura 3.35: Objeto O e imagem O'.

fundidade do objeto (p) e da imagem (p') com os índices de refração dos meios por:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{p'}{p} \tag{3.10}$$

A partir de (3.10) percebe-se que, sendo $n_1 < n_2$, vem que $p' < p$.

3.23 Refração da Luz 2

Objetivo

Visualizar o fenômeno da refração da luz.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser (ou qualquer feixe de luz colimado), 1 copo com água, 1 cartolina branca (ou qualquer superfície branca que não se deforme na água).

Montagem e Procedimento

Coloque o pedaço de cartolina na vertical dentro do copo com água. Raso ao plano da cartolina incida o feixe de luz, de modo que ele penetre na água. Observe como o feixe de luz se curva ao passar do ar para a água (Fig.3.36). A cartolina serve para melhor visualizar o feixe de luz.

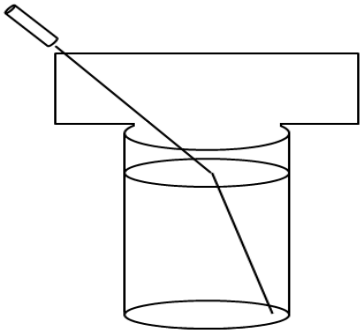

Figura 3.36: Curvamento do feixe de luz.

Análise e Explicação

O fenômeno da refração ocorre quando a luz passa de um meio para outro. A luz propaga-se com velocidades diferentes em diferentes meios. No ar, por exemplo, a sua velocidade é de cerca de $300.000km/s$, na água é $225.000km/s$ e no vidro transparente é $200.000km/s$.

A característica da refração é a alteração da velocidade de propagação da luz quando ela muda de meio, o que faz com que ocorra também uma mudança na sua direção de propagação.

Considere um feixe de luz monocromática passando de um meio A para um meio B. Ao sofrer refração a luz estabelece uma relação constante entre o produto do seno do ângulo (entre o raio e a normal) e o índice de refração do meio correspondente, de acordo com a lei de Snell-Descartes:

$$n_A sen(i) = n_B sen(r)$$

onde n_A é o índice de refração do meio A, n_B o índice de refração do meio B, i o ângulo de incidência e r o ângulo de refração.

O índice de refração absoluta n de um meio é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz nesse meio (v):

$$n = \frac{c}{v}$$

O índice de refração é uma propriedade dos materiais e quantifica a resistência que eles impõem para a propagação da luz em relação ao vácuo, meio este na qual ela não sofre nenhuma resistência. Quanto maior o valor de n para um determinado meio, menor é a velocidade de propagação da luz nesse meio.

Considere um feixe de luz passando do meio A para o meio B. Se $n_B > n_A$ o raio refratado se aproxima da normal, pois $sen(r) < sen(i)$, donde vem que $r < i$. Se $n_B < n_A$ o raio refratado se afasta da normal, pois $sen(r) > sen(i)$ e $r > i$. Se o raio incidir perpendicularmente a superfície que separa os meios, não ocorre desvio.

No experimento realizado, ao passar do ar para a água o feixe de luz sofreu difração. Como o índice de refração da água é maior que o do ar, o feixe de luz se aproximou da reta normal.

3.24 Caneta Quebrada

Objetivo

Visualizar o fenômeno da refração.

Materiais Utilizados

1 copo transparente com água, 1 caneta (ou um lápis, ou algo semelhante).

Montagem e Procedimento

Coloque a caneta dentro do copo com água, de modo que ela fique obliqua em relação a superfície da água. Olhando lateralmente ao conjunto observe que a caneta parece estar quebrada na superfície da água (Fig.3.37).

Figura 3.37: Caneta quebrada.

Análise e Explicação

Este fenômeno ocorre devido a refração da luz. A água não curva a caneta, mas sim a luz por ele refletida. Quando chega a superfície da água a luz muda de direção, dando a impressão que a caneta está quebrada.

3.25 Propagação Não-Retilínea da Luz

Objetivo

Criar um meio heterogêneo e observar nele a propagação não-retilínea da luz.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, água, açúcar, 1 recipiente transparente grande.

Montagem e Procedimento

Encha o recipiente com água e nela misture açúcar, espalhando-a bem. Deixe cerca de 1 dia a mistura em repouso, para criar um meio heterogêneo.

Escureça o ambiente e projete a luz laser no recipiente contendo a mistura. Você verá o feixe se propagar de maneira não-retilínea.

Análise e Explicação

A luz se propaga da maneira não-retilínea (fazendo curvas) devido as sucessivas refrações que ela sofre ao transitar pelo meio heterogêneo formado pela mistura de água e açúcar. As refrações fazem com que o feixe de luz mude diversas vezes de direção.

3.26 Curvando um Feixe de Luz 1

Objetivo

Provocar a curvatura de um feixe de luz.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 recipiente transparente (pode ser o mesmo do Exp.(3.25)), água, leite em pó, 1 régua, álcool.

Montagem e Procedimento

Inicialmente coloque água no recipiente. Em seguida despeje o álcool sobre a água, fazendo-o escorrer pela régua (ou alguma outra coisa), de modo que ele se misture o mínimo possível com a água[10]. Esparrame um pouco de leite em pó sobre o líquido, aguardando um pouco para que ele se misture com o mesmo.

Em seguida incida a luz do laser no recipiente de modo que o feixe passe pela região entre o álcool e a água. Ajustando a direção do feixe, você verá ele fazer uma curva, como na Fig.(3.38).

Análise e Explicação

O álcool é mais refringente[11] que a água, de modo que um feixe de luz passando do álcool para a água tende a se afastar da normal, e passando da água para o álcool tende a se aproximar da normal. Na região em que os dois líquidos se misturam, o índice de refração varia entre os índices de refração do álcool e o da água, de modo que ocorre uma mudança contínua na direção de propagação do raio de luz.

[10] O álcool é menos denso que a água e, se não misturado, tende a ficar na parte superior da mistura.

[11] Possui maior índice de refração.

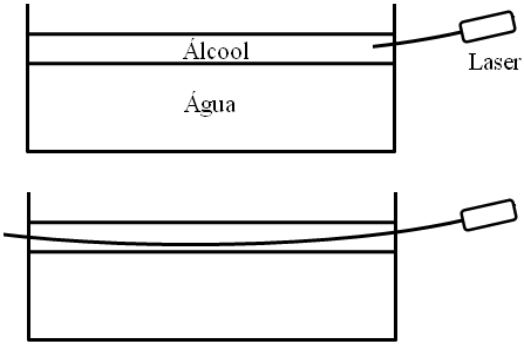

Figura 3.38: Curvando a luz do laser.

3.27 Curvando um Feixe de Luz 2

Objetivo

Curvar um feixe de luz laser.

Materiais Utilizados

5 ou mais copos cilíndricos, uma ponteira laser, água, leite.

Montagem e Procedimento

Encha os copos de água misturada com algumas gotas de leite e coloque-os um ao lado do outro. Posicione a ponteira laser próximo à parede do primeiro copo e ajuste-os de modo a obter segmentos de luz formando um arco (Fig.3.39).

Análise e Explicação

O feixe do laser é refratado quando incide e quando sai dos copos, mudando de direção, já que a água e o ar têm índices de refração diferentes.

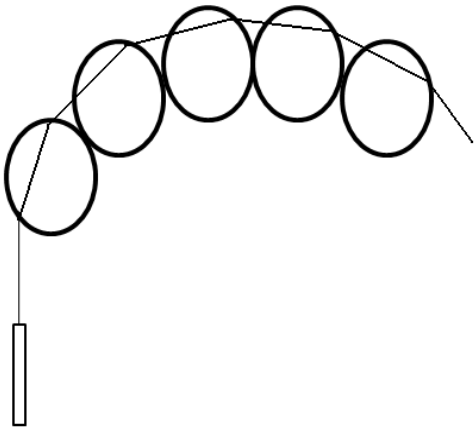

Figura 3.39: Arco de luz.

3.28 Desvio Lateral da Luz

Objetivo

Verificar o desvio lateral da luz numa lâmina de vidro de faces paralelas.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 lâmina de vidro de faces paralelas.

Montagem e Procedimento

Foque o feixe de laser na lâmina espessa de vidro e observe nela o desvio lateral da luz.

Análise e Explicação

Um sistema formado por um meio transparente e homogêneo constituído por 2 superfícies de separação planas e paralelas, no qual a luz pode se propagar, é chamado de lâmina de faces paralelas. Os vidros de janela são exem-

plos desse tipo de lâmina, onde a luz proveniente do ar atravessa a lâmina, propaga-se pelo vidro e emerge novamente no ar.

Na Fig.(3.40) há a representação esquemática de um raio luminoso que atravessa uma lâmina de faces paralelas imersa no ar, sofrendo um desvio lateral.

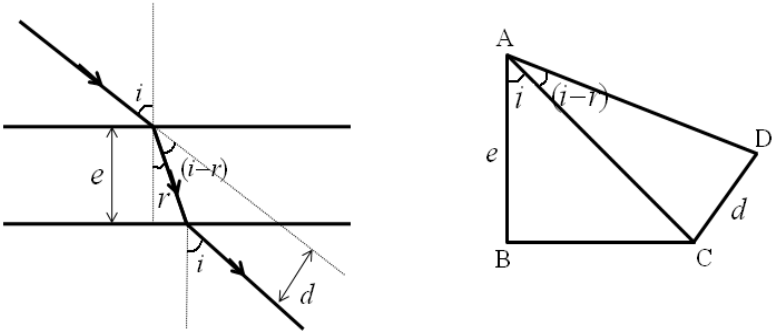

Figura 3.40: Desvio lateral de um feixe de luz numa lâmina de faces paralelas.

Do triângulo ACD vem que:

$$sen(i-r) = \frac{d}{AC} \tag{3.11}$$

Do triângulo ABC tem-se que:

$$cos(r) = \frac{e}{AC} \tag{3.12}$$

Igualando as Eqs.(3.11) e (3.12) vem que:

$$\frac{d}{sen(i-r)} = \frac{e}{cos(r)}$$

donde vem que o desvio lateral d é dado por:

$$d = e\frac{sen(i-r)}{cos(r)}$$

O feixe não sofre desvio angular na sua trajetória e o raio emergente mantém a mesma direção do raio incidente.

3.29 Índice de Refração de Sólidos

Objetivos

Determinar o índice de refração do vidro e a velocidade de propagação da luz nesse material com base no índice de refração do ar.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 transferidor, 1 folha de papel branco, 1 lâmina de vidro, 1 caneta, 1 régua.

Montagem e Procedimento

Disponha a folha de papel branco sobre uma superfície horizontal plana e coloque o pedaço de vidro sobre a folha de papel. Em seguida coloque a ponteira laser encostada no vidro e faça incidir o feixe de luz bem no meio da superfície plana fazendo um ângulo diferente de $0°$ com a normal, como mostra o esquema da Fig.(3.41). O meio A é o ar e o meio B o vidro.

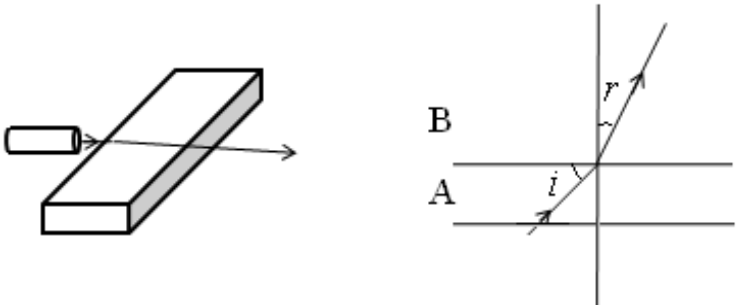

Figura 3.41: Incidência de luz na lâmina de vidro.

Varie o ângulo de incidência i e observe a trajetória do feixe luminoso que atravessa o vidro e penetra no ar. Marque com a caneta na folha de papel os pontos onde o raio incide e onde ele sai do vidro, bem como trace uma reta paralela à face de incidência e descreva a trajetória no ar.

Em seguida trace na folha de papel a trajetória do raio, a reta normal ao plano de incidência, e com o transferidor meça os ângulos de incidência (i) e de refração (r).

Repita este procedimento algumas vezes mudando o ângulo de incidência e anote os resultados obtidos.

Usando as relações:

$$n_A sen(i) = n_B sen(r)$$

e

$$n = \frac{c}{v}$$

e conhecendo o índice de refração do ar ($n_{ar} = 1$) e a velocidade de propagação da luz no vácuo ($c \simeq 3 \times 10^8 m/s$), encontre o índice de refração do vidro (n_{vidro}) e a velocidade de propagação da luz nesse material (v_{vidro}).

Análise e Explicação

Obtendo os dados experimentais encontra-se o índice de refração do vidro a partir da relação:

$$n_{vidro} = \frac{sen(i)}{sen(r)}$$

e a velocidade da luz no vidro como:

$$v_{vidro} = \frac{3 \times 10^8}{n_{vidro}}$$

O índice de refração do vidro comum é de cerca de $1,52$ e a velocidade da luz nesse mesmo material é $1,97 \times 10^8 m/s$.

3.30 Reflexão Total da Luz 1

Objetivo

Verificar a reflexão total da luz.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, água, 1 recipiente transparente (com no mínimo uns $10cm$ de altura, leite em pó (ou pó de giz).

Montagem e Procedimento

Coloque água no recipiente e adicione um pouco de leite em pó, mexendo-o de modo à dissolvê-lo e tornando a mistura homogênea. Projete o feixe de laser na lateral do recipiente, obliquamente de baixo para cima. Varie sua direção até obter a reflexão total (Fig.3.42).

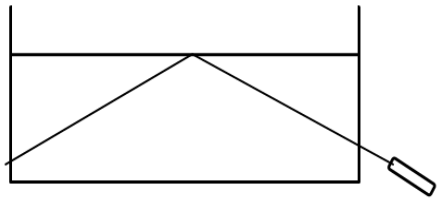

Figura 3.42: Incidência da luz laser na água.

Análise e Explicação

Quando um feixe de luz passa de um meio para outro, com diferentes índices de refração, ele muda a sua direção de propagação.

Passando da água para o ar, ou seja, de um meio com maior índice para outro com menor índice de refração, o feixe de luz tende a se afastar da normal (linha perpendicular ao plano que separa dos dois meios). A medida que aumenta-se o ângulo de incidência i, aumenta-se também o ângulo de refração r até que em um determinado ângulo i o raio emergente fica rasante à

superfície ($r = 90°$). Nesse caso tem-se a condição limite e o ângulo de incidência é denominado ângulo limite L:

$$i = L$$

Para ângulos $i > L$ passa a haver o fenômeno de reflexão total, como mostrado na Fig.(3.43).

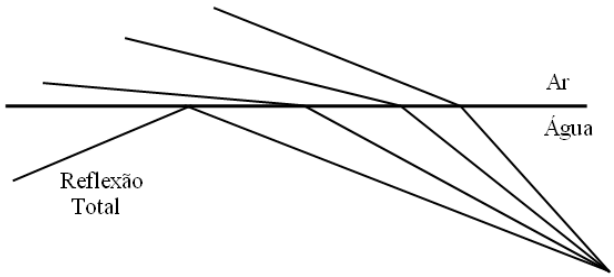

Figura 3.43: Reflexão total da luz laser.

O leite em pó adicionado na água serve para ver melhor a trajetória do feixe de luz. Isso ocorre porque, ao colidir com as partículas de leite dissolvidas na água, a luz é refletida. A experiência pode ficar melhor visível se for escurecido o ambiente.

3.31 Reflexão Total da Luz 2

Objetivo

Verificar a reflexão total da luz de um feixe de laser.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 garrafa PET, 1 prego, 1 anteparo branco, água.

Montagem e Procedimento

Com o prego faça um orifício na parte lateral inferior da garrafa PET e após encha-a de água, de modo que saia um esguicho pelo orifício. Controle a sua vazão abrindo mais ou menos a tampa da garrafa. E seguida incida o feixe de luz laser no outro lado da garrafa, fazendo com que ele saia junto com o esguicho de água. Coloque o anteparo de modo que o jato de água incida nele e observe a luz do laser junto dele. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(3.44).

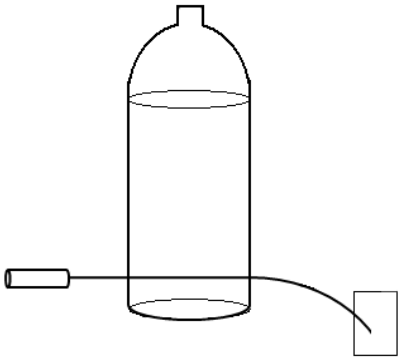

Figura 3.44: Luz do laser seguindo o jato de água.

Análise e Explicação

Ao tentar sair do jato de água a luz do laser acaba sofrendo reflexão total e acompanha o jato, incidindo no anteparo. Da água para o ar a luz tem um ângulo de reflexão total em torno de $49°$.

3.32 Ângulo Limite

Objetivo

Determinar o ângulo limite para a ocorrência da reflexão total da luz entre a água e o ar.

Materiais Utilizados

1 disco de cortiça (ou isopor, de 5 a $6cm$ de diâmetro), 1 prego (tamanho médio), 1 recipiente cheio de água, 1 régua.

Montagem e Procedimento

Introduza o prego no centro do disco. Em seguida coloque esse conjunto no recipiente com água, fazendo-o flutuar, de modo que o prego fique com sua maior parte para baixo, e que você consiga enxergar a cabeça do prego, olhando pela superfície (Fig.3.45-a).

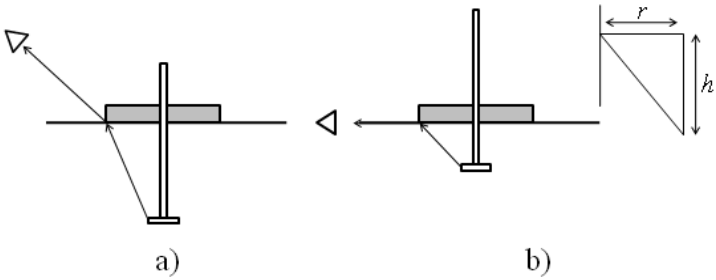

Figura 3.45: O observador: a- Enxerga a cabeça do prego; b- Não enxerga mais a cabeça do prego.

Vá elevando a cabeça do prego, introduzindo-o cada vez mais no disco, até chegar numa situação em que, olhando raso ao nível da superfície da água, você não consiga vê-la mais. Nesse momento atingiu-se o ângulo limite, e os raios de luz que vêm da cabeça do prego não passam mais para o ar (Fig.3.45-b).

Retire o conjunto da água é meça o raio r do disco e a distância h, sendo esta da cabeça do prego à borda do disco. Através dessas duas medidas determine o ângulo limite.

Análise e Explicação

Passando da água para o ar, ou seja, de um meio com maior índice para outro com menor índice de refração, o feixe de luz tende a se afastar da normal.

Aplicando a lei de Snell-Descartes na passagem de um raio de luz da água para o ar, tem-se que:

$$n_{água} sen(i) = n_{ar} sen(r)$$

No ângulo limite $i = L$, tem-se que $r = 90°$, e:

$$sen(L) = \frac{n_{ar}}{n_{água}}$$

donde vem que L é dado por:

$$L = sen^{-1}\left(\frac{n_{ar}}{n_{água}}\right) \tag{3.13}$$

O fenômeno da reflexão total ocorre somente quando a luz se propaga se um meio de maior índice de refração para outro meio de menor índice de refração. O ângulo limite da Eq.(3.13) pode ser generalizado, sendo dado como:

$$L = sen^{-1}\left(\frac{n_{menor}}{n_{maior}}\right)$$

3.33 Fibra Óptica

Objetivo

Verificar a estrutura e o funcionamento de uma fibra óptica.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 pedaço de fibra óptica (cerca de $1m$).

Montagem e Procedimento

Foque o feixe de luz laser numa extremidade da fibra óptica e perceba que a luz sai do outro lado. Dobre o fio de diversas formas e constate que a luz é canalizada por ele.

Análise e Explicação

A fibra óptica é um material que utiliza a reflexão total da luz para transmiti-la. Foi possível construí-la com o desenvolvimento da tecnologia do quartzo, que propiciou a obtenção de fios muito finos e transparentes, os quais podem ser encurvados sem se romperem.

O esquema da Fig.(3.46) representa uma seção transversal de uma fibra óptica.

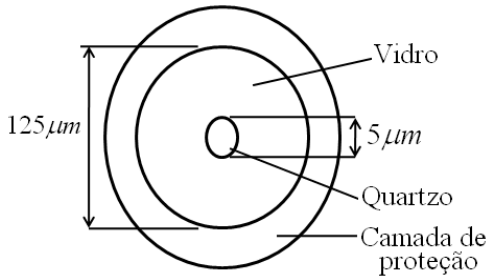

Figura 3.46: Seção transversal de uma fibra óptica.

O núcleo de quartzo da fibra possui índice de refração maior do que o revestimento de vidro. Isso faz com que a luz sofra reflexão total ao tentar sair do núcleo, acabando por se propagar ao longo do fio.

As fibras ópticas possuem elevada capacidade de transmissão de informações à longas distâncias e, entre as diversas vantagens, não sofrem interferências eletromagnéticas.

3.34 Refração e Reflexão num Espelho

Objetivo

Verificar a relação entre refração e reflexão com a luminosidade do ambiente.

Materiais Utilizados

1 placa de vidro transparente, 2 lâmpadas elétricas com reostatos (para controlar as suas potências), 2 pessoas (você e um colega).

Montagem e Procedimento

Posicione a placa de vidro transparente na vertical entre as 2 pessoas, de forma que elas fiquem frente a frente. De cada lado do espelho coloque uma lâmpada, acoplada à um reostato, de modo que é possível variar a luminosidade de cada uma através do controle da intensidade da corrente elétrica[12].

Num ambiente sem nenhuma outra fonte de luz, dependendo da luminosidade de cada lâmpada, ao olhar para o vidro você verá a sua imagem ou a imagem do seu colega que está no outro lado do espelho. Aquele que estiver mais iluminado verá o vidro refletir a sua própria imagem, como um espelho, e aquele que estiver sob a luz mais fraca observará o vidro transparente e a imagem do colega que se encontra do outro lado.

Invertendo gradativamente a intensidade da luz nas 2 lâmpadas, a função do vidro também se inverterá: o reflexo da imagem começa a se sobrepor a imagem que está do outro lado, e vice-versa.

Análise e Explicação

Quando um feixe de luz atinge uma superfície de vidro transparente, ele pode ser transmitido, refletido ou parcialmente transmitido e parcialmente refletido. Isso vai depender do ângulo de incidência em relação à normal e da intensidade luminosa do feixe.

[12] Um esquema mais elaborado é montar um reostato que, enquanto aumenta-se a intensidade de uma das lâmpadas, automaticamente diminui-se a da outra.

A porcentagem de luz transmitida é máxima quando ela incide perpendicularmente ao vidro e vai diminuindo com o aumento do ângulo de incidência. A medida que o ângulo de incidência aumenta a porcentagem da radiação refletida também aumenta. Para ângulos de incidência maiores que $80°$ a porcentagem da luz refletida torna-se maior do que a refratada (ou transmitida) e o vidro comporta-se praticamente como um espelho.

Mesmo para pequenos ângulos de incidência a placa de vidro transparente pode se comportar como um espelho. Para isso basta que a intensidade da luz incidente seja alta. É através disso que os espelhos presentes no nosso dia-a-dia funcionam.

3.35 Refração e Invisibilidade

Objetivo

Verificar como um objeto pode se tornar invisível.

Materiais Utilizados

1 bastão de vidro, 2 béquers, água, tetracloroetilino (C_2Cl_4) ou monoclorobenzeno.

Montagem e Procedimento

Coloque água num béquer e C_2Cl_4 no outro. Introduza o bastão de vidro no béquer com água e depois no béquer com C_2Cl_4. Observe que a parte imersa do bastão de vidro em água é quase tão visível quanto a parte que está fora (Fig.3.47-a). No entanto, quando este mesmo bastão é mergulhado em C_2Cl_4, a parte imersa torna-se quase ou totalmente invisível (Fig.3.47-b).

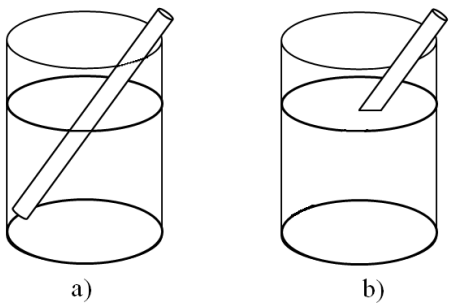

Figura 3.47: Bastão de vidro mergulhado: a- Na água; b- Em C_2Cl_4.

Uma variante desse experimento é realizado com uma garrafa pequena de vidro transparente e incolor, cheia de glicerina, e um copo de vidro transparente (de cerca de $250ml$), contendo também um pouco de glicerina. Mergulhando a garrafa no líquido do copo, a parte da garrafa que fica em contato com a glicerina desaparece para quem olha lateralmente.

Análise e Explicação

O diopto em forma cilíndrica (formado pelo copo) desvia a trajetória dos raios refletidos na parede da garrafa, como se fosse uma lente convergente. De acordo com o esquema da Fig.(3.48), onde o conjunto é visto de cima, os raios refletidos passam de um meio mais refringente (C_2Cl_4) para um meio menos refringente (ar) incidindo na superfície do copo de vidro com um certo ângulo em relação à normal, o que causa a refração. Isso faz com que seja vista uma imagem ampliada da garrafa (círculo pontilhando na Fig.(3.48)).

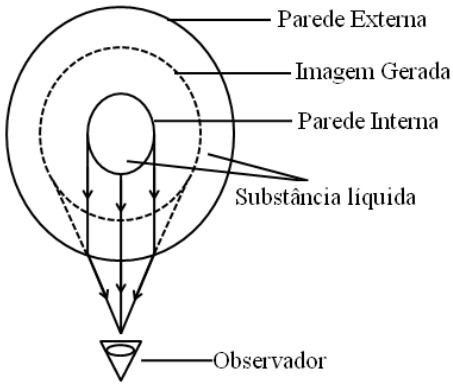

Figura 3.48: Garrafa situada no interior do copo.

Para fazer com que a garrafa desapareça é necessário um diâmetro conveniente do copo, de modo que sua parede coincida com a imagem da garrafa.

Uma explicação tradicional para este fenômeno, porém incorreta, refere-se ao fato de os índices de refração do vidro e do C_2Cl_4 (ou glicerina) serem aproximadamente iguais (o vidro apresenta $n = 1,50$ e a glicerina $n = 1,47$). Dessa forma há uma continuidade óptica na interface líquido-vidro e a luz praticamente não percebe a mudança no meio de propagação quando passa do líquido para o vidro ou do vidro para o líquido, não sofrendo reflexões.

Na verdade, a proximidade dos valores dos índices de refração do vidro e do C_2Cl_4 (ou glicerina) não é suficiente para que a garrafa desapareça.

Se o copo cilíndrico, por exemplo, for trocado por um recipiente de vidro retangular, a garrafa submersa no líquido torna-se visível. Além disso, a invisibilidade da garrafa pode ser conseguida com outras substâncias líquidas, como a água ou o óleo, bastando para isso ajustar o tamanhos dos recipientes cilíndricos.

3.36 Lentes Esféricas

Objetivos

Verificar o comportamento de raios de luz incidentes em lentes esféricas e determinar as suas distâncias focais.

Materiais Utilizados

Diversas lentes convergentes (pelo menos 1 lente convergente e 1 lente divergente), 1 lanterna geradora de raios paralelos[13], 1 régua,

Montagem e Procedimento

Incida os raios paralelos nas lentes, veja o comportamento dos mesmos e determine as distâncias focais.

Análise e Explicação

Lentes são dispositivos empregados em diversos tipos de instrumentos, como em óculos e microscópios. Ela é constituída por um meio transparente limitado por faces curvas, normalmente esféricas. Esse meio geralmente é o vidro ou um plástico.

As lentes esféricas possuem faces côncavas ou convexas, podendo uma delas ser plana. Na Fig.(3.49) tem-se os principais formatos de lentes esféricas.

As lentes que apresentam as extremidades mais finas do que a parte central são convergentes, de modo que os raios que nela incidem cortam o eixo central em um determinado ponto. As lentes que apresentam as extremidades mais espessas do que a parte central são divergentes e os raios de luz que nelas incidem se afastam do eixo central.

As lentes possuem 2 focos, como será visto a seguir. Na Fig.(3.50) raios paralelos de luz incidem em uma lente convergente. Após atravessá-la o feixe converge para um ponto do eixo (F), o qual é denominado 1° foco da lente.

[13] Uma forma simples de fazer isso é cobrir a frente da lanterna com um material opaco, o qual contenha apenas 3 ou 4 furos, os quais gerarão os raios paralelos.

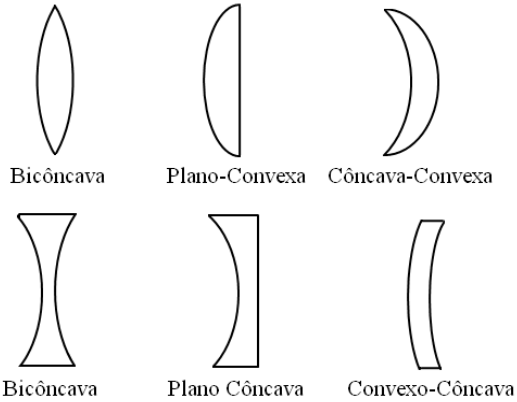

Figura 3.49: Principais formatos de lentes esféricas.

Se for feito um feixe de raios paralelos incidir na outra face da lente o feixe convergirá no ponto F', que é denominado $2°$ foco da lente. As distâncias de F a lente e de F' a lente são iguais, e a mesma é denominada distância focal (f) da lente.

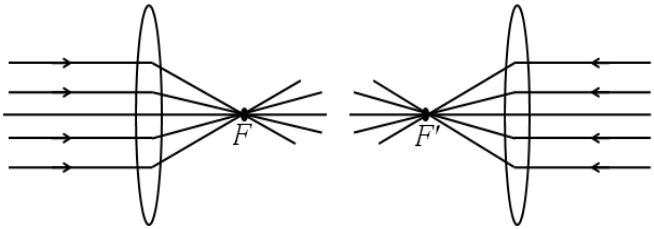

Figura 3.50: Focos de lentes esféricas convergentes.

Quando um feixe de luz incide em uma lente divergente, paralelamente ao seu eixo principal, após atravessá-la os raios luminosos divergem de tal modo que seus prolongamentos se encontram sobre um ponto F do eixo, o qual é denominado $1°$ foco da lente, como mostra a Fig.(3.51).

Se o feixe incidir na outra face da lente ter-se-a raios emergentes que divergem de tal modo que seus prolongamentos se encontram no ponto F',

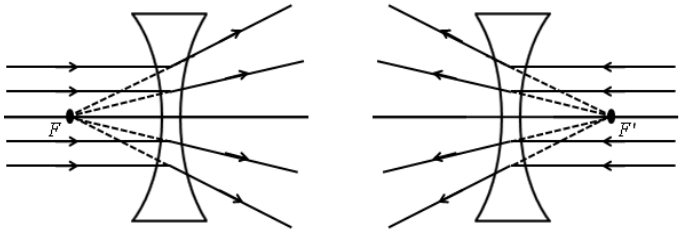

Figura 3.51: Focos de lentes esféricas divergentes.

que é o 2° foco da lente. Ambos os focos também estão situados a uma distância f (distância focal) da lente.

Para facilitar a construção de diagramas costuma-se representar uma lente convergente como na Fig.(3.52-a) e uma lente divergente como na Fig.(3.52-b).

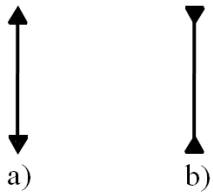

Figura 3.52: a- Lente convergente; b- Lente divergente.

Os focos de uma lente convergente são reais, enquanto os de uma lente divergente são virtuais. Nas lentes convergente os focos são determinados efetivamente pelos raios de luz, enquanto nas lentes divergentes eles são determinados pelos prolongamentos dos raios. As lentes sempre possuem 2 focos se os raios incidentes forem paralelos ao eixo principal. Se os raios não forem paralelos ao eixo principal as lentes podem possuir infinitos focos secundários.

Uma lente será tanto mais forte quanto maior for o seu poder de alterar a trajetória da luz. A grandeza física que quantifica isso é a vergência V, que

relaciona-se com a distância focal f por:

$$V = \frac{1}{f}$$

Quanto menor o valor de f, maior o valor de V. A vergência é uma grandeza algébrica e o seu sinal é o mesmo que o da distância focal: nas lentes convergentes $f > 0$ e $V > 0$ e nas lentes divergentes $f < 0$ e $V < 0$. A unidade de V é o inverso da unidade de comprimento (m), chamada dioptria (di):

$$\frac{1}{m} = m^{-1} = di$$

A dioptria relaciona-se diretamente com a medida em graus, mais utilizada popularmente, de modo que:

$$1^\circ = 1di$$

3.37 Lente Esférica Divergente

Objetivo

Verificar a formação de imagens por uma lente esférica divergente.

Materiais Utilizados

1 lente esférica divergente, 1 objeto qualquer.

Montagem e Procedimento

Segurando a lente próxima ao seus olhos, olhe através dela para o objeto selecionado. Veja como é formada a imagem desse objeto.

Análise e Explicação

Numa lente divergente qualquer que seja a posição do objeto (RS) em relação à lente[14], sempre obtêm-se uma imagem ($R'S'$) virtual, direita e menor, como mostra o esquema da Fig.(3.53). A imagem formada situa-se sempre entre a lente e o foco F.

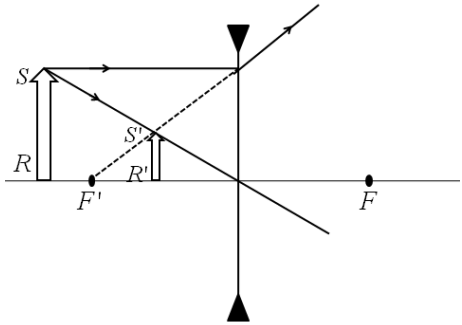

Figura 3.53: Formação de imagem numa lente esférica divergente.

[14]Quando fala-se de uma distância em relação à lente, esta distância refere-se ao centro óptico da lente.

A posição das imagem formada em relação ao centro da lente, tanto nas lentes divergentes como nas convergentes, e o seu respectivo aumento, calcula-se da mesma maneira que nos espelhos esféricos, através das relações:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

onde f é a distância focal da lente, p a distância do objeto à lente, p' a distância da imagem à lente, A o aumento linear transversal, o a altura do objeto e i a altura da imagem.

3.38 Lente Esférica Convergente

Objetivo

Verificar a formação de imagens por uma lente esférica convergente.

Materiais Utilizados

1 lente esférica convergente, 1 objeto qualquer.

Montagem e Procedimento

Segure a lente próxima ao seus olhos e olhe através dela para o objeto selecionado. Veja como é a imagem desse objeto. Varie a distância entre a lente e o objeto e perceba as diferentes características das imagens formadas.

Análise e Explicação

Numa lente convergente a imagem assume diversas características, dependendo da posição do objeto em relação à lente. Quando o objeto localiza-se além do ponto antiprincipal[15] objeto A a imagem formada ($R'S'$) é real, invertida e menor, como mostra a Fig.(3.54).

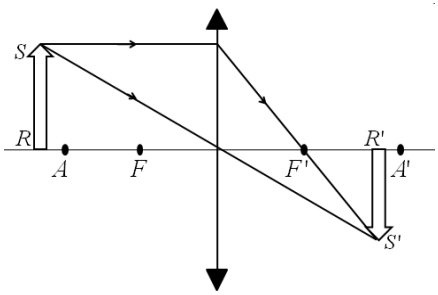

Figura 3.54: Objeto localizado além do ponto A.

[15]Os pontos do eixo principal de uma lente cuja distância em relação ao centro óptico vale $2f$, $A = A' = 2f$. São chamados de pontos principais: A: ponto principal objeto e A': ponto principal imagem.

Se o objeto estiver localizado no ponto antiprincipal objeto a imagem formada será real, invertida e do mesmo tamanho que o objeto, e estará localiza sobre A', como mostra o esquema da Fig.(3.55).

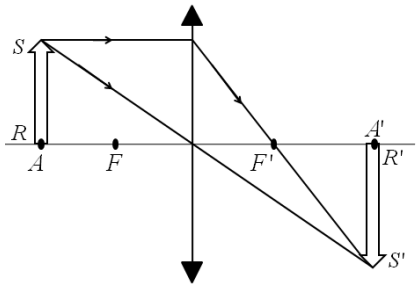

Figura 3.55: Objeto situado sobre o ponto A.

Se o objeto for situado entre ponto antiprincipal objeto e o foco principal F, a imagem formada será real, invertida e maior (Fig.3.56).

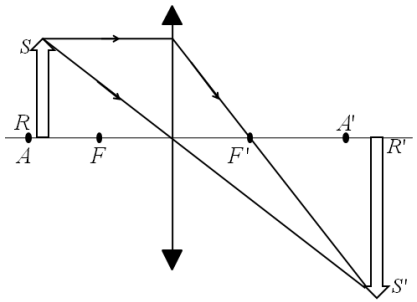

Figura 3.56: Objeto localizado entre A e F.

Se o objeto estiver localizado sobre o foco principal F, não ocorrerá formação de imagem (imagem imprópria). Isso ocorre porque os raios luminosos emergentes da lente são paralelos e se cruzam (formam a imagem) no infinito, como representado na Fig.(3.57)

Se o objeto for colocado entre F e o centro óptico da lente, a imagem formada será virtual, direita e maior (Fig.3.58).

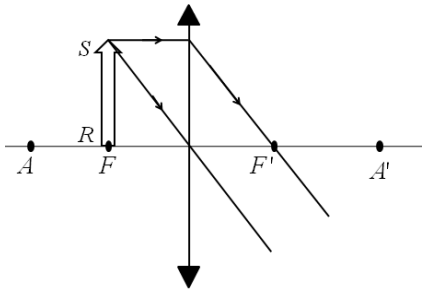

Figura 3.57: Objeto situado sobre F.

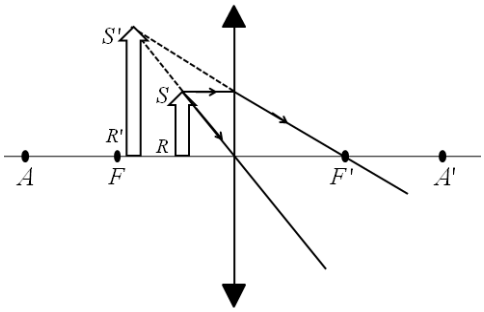

Figura 3.58: Objeto localizado entre F e o centro da lente.

3.39 Projeção de Imagens por uma Lente Convergente

Objetivo

Verificar a projeção de imagens reais por lentes convergentes.

Materiais Utilizados

1 vela, 1 lente convergente (ou mais), 1 lente divergente, 1 anteparo branco, suportes.

Montagem e Procedimento

Coloque a vela, a lente convergente e o anteparo presos em suportes, e disponha-os de modo que fiquem alinhados, como no esquema da Fig.(3.59).

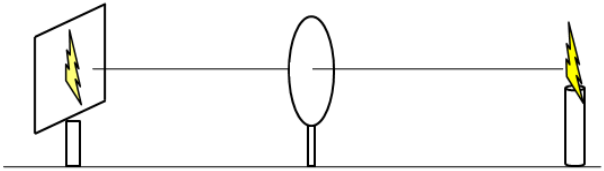

Figura 3.59: Vela, lente convergente e anteparo alinhados.

Acenda a vela e deixe o ambiente escurecido. Altere a distância entre os componentes, de modo a formar uma imagem nítida da chama da vela no anteparo. Se dispor, pode repetir o mesmo experimento utilizando outras lentes convergentes.

Substitua a lente convergente pela lente divergente e perceba que não é possível projetar a imagem da chama da vela no anteparo.

Análise e Explicação

Somente podem ser projetadas imagens reais. As lentes convergentes produzem imagens reais, de modo que elas podem ser usadas para projetar imagens. Com a lente divergente não é possível fazer projeções de imagens porque as lentes divergentes geram somente imagens virtuais.

3.40 Distância Focal de um Lente Esférica

Objetivo

Determinar a distância focal de uma lente esférica plano-convexa.

Materiais Utilizados

1 lente esférica convexa, 1 lanterna, 1 objeto, 1 anteparo.

Montagem e Procedimento

Coloque o anteparo, a lente, o objeto e a lanterna alinhados, como mostra o esquema da Fig.(3.60), no qual tem-se uma vista superior do experimento.

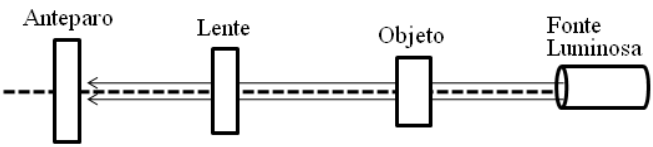

Figura 3.60: Anteparo, lente, objeto e lanterna alinhados.

Obtenha imagens nítidas do objeto sobre o anteparo variando os valores de p e p', os quais são, respectivamente, a distância entre o objeto e a lente e a distância entre a lente e o anteparo (imagem). Através desses dados determine a distância focal da lente.

Análise e Explicação

Na Tab.(3.2) estão presentes os valores de p e p' obtidos através da utilização de uma lente plano-convexa de distância focal $f = 125mm$. Junto está o valor correspondente de f calculado pela relação (3.9):

$$f = \frac{pp'}{p + p'}$$

Tabela 3.2: Valores de p, p' e f de uma lente plano-convexa.

$p(cm)$	$p'(cm)$	$f(cm)$
17,2	44,7	12,42
15,0	69,5	12,34
20,5	31,0	12,34
22,0	28,0	12,32
26,0	24,5	12,61
15,0	82,0	12,68
15,1	69,1	12,39
16,0	55,5	12,42
18,8	37,0	12,47
15,9	55,0	12,33
19,3	35,7	12,53
14,0	125,0	12,59

Fazendo uma média de f encontra-se $f = 12,45cm$ ou $f = 124,5mm$. Utilizando o valor de f em metros calcula-se a vergência dessa lente por:

$$V = \frac{1}{f}$$

donde vem $f \simeq 8di$.

3.41 Utilizando uma Lupa

Objetivo

Utilizar e estudar o funcionamento de uma lupa.

Materiais Utilizados

1 lupa, 1 objeto qualquer.

Montagem e Procedimento

Utilize a lupa para observar o objeto. Perceba que, ao aproximar a lupa à uma certa distância do objeto, a imagem do mesmo fica ampliada. Como é que a lupa consegue aumentar a imagem do objeto observado?

Análise e Explicação

Uma lupa é uma lente convergente. Quando um objeto é colocado entre uma lente convergente e o seu foco, obtêm-se uma imagem virtual e maior do objeto. Na Fig.(3.61) tem-se um esquema da formação da imagem $R'S'$ do objeto RS.

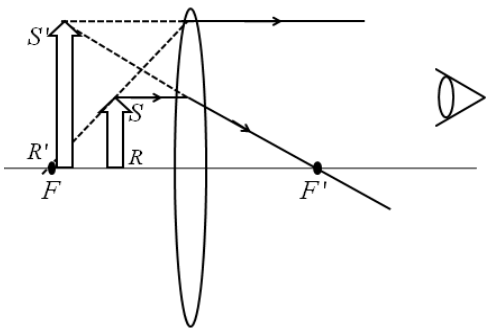

Figura 3.61: Formação da imagem na lupa.

Nessas condições a imagem formada na lupa é virtual, direita e maior que

o objeto. Quanto menor for a distância focal da lente convergente, maior será a ampliação que é possível obter com ela.

Os microscópios e as lunetas também utilizam uma lente convergente (ou um conjunto destas), de modo que o objeto sempre fique situado entre o foco principal e o centro óptico, fornecendo uma imagem virtual, direita e ampliada. Para o observador a imagem fornecida comporta-se como um objeto real. As câmeras fotográficas também utilizam um sistema convergente (formado por uma ou mais lentes) para captar as imagens.

3.42 Tipo de Óculos e Defeitos de Visão

Objetivo

Estudar os diversos tipos de óculos e os defeitos de visão.

Materiais Utilizados

Diferentes óculos (de lente), 1 objeto qualquer.

Montagem e Procedimento

Coloque o óculos entre o objeto e o seu olho. Observe se a imagem ficou diminuída ou ampliada? Se a imagem ficou diminuída a lente é divergente e é usada para corrigir a miopia, que é a dificuldade de enxergar objetos distantes. Se a imagem ficou ampliada trata-se de uma lente convergente, sendo esta usada para corrigir hipermetropia, que é a dificuldade de enxergar objetos próximos.

Em seguida olhe o objeto através da lente do óculos mantida a cerca de $0,5m$ do seu olho e faça uma rotação. Observe se a imagem ficou deformada. Se ocorrer deformação da imagem com a rotação da lente significa que a lente tem correção para o astigmatismo, que consiste na perda de focalização em determinadas direções.

Análise e Explicação

A seguir será comentado sobre os principais problemas de visão e o tipo de lente usada para corrigi-los.

Miopia é a dificuldade de enxergar longe, devido a um alongamento do bulbo do olho. Ao visar um objeto situado longe, o olho míope conjuga uma imagem real situada antes da retina, que é enxergada embaraçada. Na Fig.(3.62-a) tem-se um esquema da formação da imagem num olho normal e na Fig.(3.62-b) a formação de imagem num olho com miopia.

A correção da miopia é feita com o uso de lentes divergentes, as quais conjugam uma imagem virtual numa posição apropriada.

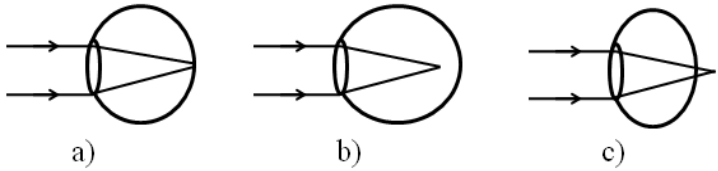

Figura 3.62: Olho: a- Normal; b- Com miopia; c- Com hipermetropia.

Hipermetropia é a dificuldade de exergar perto devido à um encurtamento do bulbo do olho. O olho hipermetrope, ao visar um objeto situado próximo, conjuga uma imagem real situada depois da retina, como mostra o esquema da Fig.(3.62-c). A correção é feita com o uso de lentes convergentes.

Presbiopia ou vista cansada é um defeito que consiste no enrijecimento dos músculos ciliares ou da própria lente natural do olho, o que faz com que a pessoa tenha dificuldades em ver, tanto longe como perto. A correção da presbiopia é feita através do uso de lentes bifocais que tem uma região destinada á visão de objetos longínquos e outra destinada à visão de objetos próximos.

O astigmatismo consiste na imperfeição na simetria de revolução do sistema óptico ocular em torno do seu eixo óptico. Geralmente deve-se a irregularidades na curvatura da córnea. Sua correção é feita mediante o uso de lentes cilíndricas, as quais compensam a assimetria ocular.

O vidro já era conhecido no Egito desde os anos 3.500 a.C. e lentes rudimentares foram descobertas em Creta, cuja idade é de cerca de 2.000 a.C.. As lentes se popularizaram por meio dos óculos com a invenção da imprensa no século XV, pois eles eram cada vez mais necessários para a leitura.

3.43 Lente Cilíndrica

Objetivo

Construir e estudar uma lente cilíndrica.

Materiais Utilizados

1 copo de vidro transparente, água, 1 vela, fósforo, 1 anteparo (parede ou folha branca).

Montagem e Procedimento

Neste experimento será construido uma lente cilíndrica e simulado o seu funcionamento.

Encha o copo com água e acenda a vela. Deixe o ambiente escurecido (sem outras fontes de luz) e posicione a vela de modo que sua luz passe pelo copo e incida no anteparo. Estando o copo na posição vertical, na mesma direção da vela, veja a imagem que a chama projeta na parede (Fig.3.63-a).

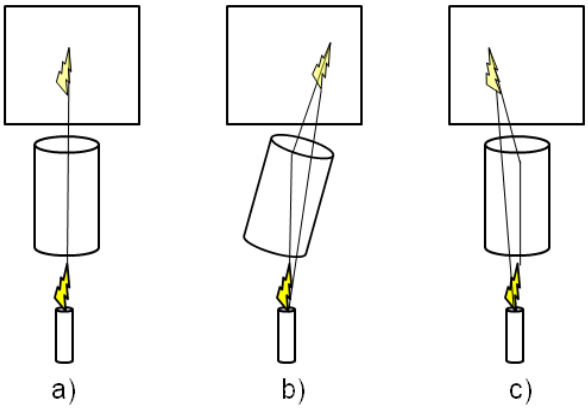

Figura 3.63: Copo: a- Na vertical; b- Girado à direita; c- Girado à esquerda.

Agora gire o copo para a direita (Fig.3.63-b) e para a esquerda (Fig.3.63-c). Perceba que a imagem da chama projetada pelo copo encurva-se no sen-

tido do giro do copo.

Análise e Explicação

Neste experimento o copo de vidro transparente com água comporta-se como uma lente cilíndrica. As lentes cilíndricas são usadas para corrigir um problema de visão chamado astigmatismo. O astigmatismo decorre de uma deformação não uniforme da curvatura da córnea do olho humano, que não permite ver todas as partes de uma imagem ao mesmo tempo. Isso significa que a luz de qualquer ponto originada de um objeto não consegue convergir para formar todas as partes da imagem na retina.

Nas lentes esféricas, utilizadas para corrigir os problemas de miopia e hipermetropia, por exemplo, a simetria da lente permite a formação da imagem proporcionalmente em todas as direções. Já as lentes cilíndricas mudam a distância focal do olho na direção onde o raio de curvatura da córnea difere de suas demais partes.

3.44 Ângulo de Visão

Objetivo

Determinar o ângulo de visão de uma pessoa.

Materiais Utilizados

2 lápis (ou 2 canetas), 1 barbante, 1 transferidor, 3 pessoas (você e mais 2 colegas).

Montagem e Procedimento

Amarre um lápis em cada extremidade do barbante (o qual deve ter o comprimento das distância entre seus braços abertos), e peça aos colegas que o estiquem, como representado na Fig.(3.64). Segure com a mão a parte mediana do barbante na frente dos seus olhos, fixando a sua visão nesse ponto. Peça para seus colegas irem aumentando o ângulo de abertura, segurando o barbante esticado, até o ponto onde você seja capaz de ver os 2 lápis simultaneamente. Com o transferidor meça o ângulo θ formado entre os 2 segmentos do barbante.

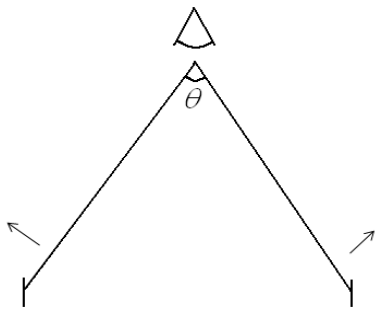

Figura 3.64: Ângulo de visão.

Análise e Explicação

O ângulo medido compreende ao campo de visão dos nossos olhos. Nossa visão abrange cerca de $180°$, mas as imagens não são tão nítidas na periferia. Alguns outros animais, com os olhos situados mais nos lados da cabeça, têm um ângulo de visão superior à $300°$.

3.45 Fotografia e Olhos Vermelhos

Objetivo

Verificar e estudar o porquê da existência de olhos vermelhos em certas fotografias.

Materiais Utilizados

1 câmera fotográfica digital.

Montagem e Procedimento

Num ambiente escurecido tire fotografias do rosto de algumas pessoas com uma câmera fotográfica com o flash acionado[16]. Perceba que em algumas fotografias os olhos das pessoas aparecem vermelhos. Mas por que isso ocorre se a câmera somente capta as imagens e os olhos das pessoas não são vermelhos?

Análise e Explicação

A cor vermelha que aparece na região da córnea deve-se a reflexão de parte do flash na retina, camada existente no fundo do olho das pessoas, responsável pela conversão de sinais luminosos em impulsos elétricos que são levados ao cérebro.

Em ambientes pouco iluminados, a pupila fica dilatada, o que facilita a entrada da luz do flash e o seu retorno. A reflexão na retina é difusa e como a mesma é cheia de vasos sanguíneos, ela difunde intensamente o vermelho, que é a cor predominante exibida pelo sangue quando iluminado por luz branca, como a dos flashes.

[16] Atualmente é grande o acesso à câmeras fotográficas digitais, o que torna a elaboração desse experimento bastante acessível.

3.46 Pequeno Orifício e Difração

Objetivo

Visualizar o efeito da difração através de um orifício.

Materiais Utilizados

1 pedaço de papel cartolina, 1 alfinete, 1 livro.

Montagem e Procedimento

Faça um furo com o alfinete no papel cartolina. Tendo um livro aberto na sua frente, focalize algo para ler. Colocando o papel cartolina em sua frente, entre seus olhos e o livro, olhe a escrita através do orifício. Ajuste a posição adequada do papel e do olho em relação ao livro. Você notará um aumento no tamanho da imagem.

Análise e Explicação

O pequeno orifício feito no papel cartolina funciona como uma lente de aumento, permitindo a ampliação da imagem de um objeto que se encontra próximo do olho do observador. Isso deve-se ao fenômeno da difração.

A difração é explicada considerando a luz como sendo formada por ondas. Quando uma frente de ondas planas se chocam contra uma parede que contém um orifício, tal que o diâmetro do orifício é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da luz incidente, ocorrerá um espalhamento das frentes de onda, como representado na Fig.(3.65).

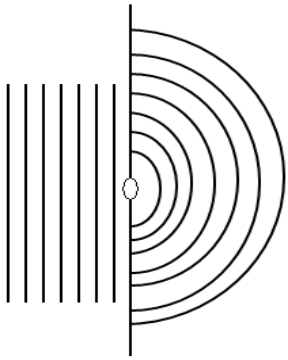

Figura 3.65: Fenômeno da difração.

3.47 Difração e Interferência da Luz 1

Objetivo

Repetir o experimento de interferência da luz realizado por Thomas Young.

Materiais Utilizados

1 pedaço grande de cartolina, 1 alfinete, 1 anteparo branco (ou uma parede branca), 1 lanterna.

Montagem e Procedimento

Com o alfinete faça 2 furos próximos na cartolina. Num ambiente escurecido incida a luz da lanterna sobre os orifícios na cartolina, deixando esta na frente da parede. Observe a formação de anéis claros e escuros na parede.

Análise e Explicação

Em 1801 a natureza ondulatória da luz foi demonstrada pelo físico e médico inglês Thomas Young. Entre os experimentos por ele descrito está o aqui realizado.

Considere a luz emitida por uma fonte luminosa, a qual atravessa os orifícios F_1 e F_2, como mostra a Fig.(3.66). Nesses orifícios a luz se difrata e tudo se passa como se existisse 2 fontes luminosas F_1 e F_2.

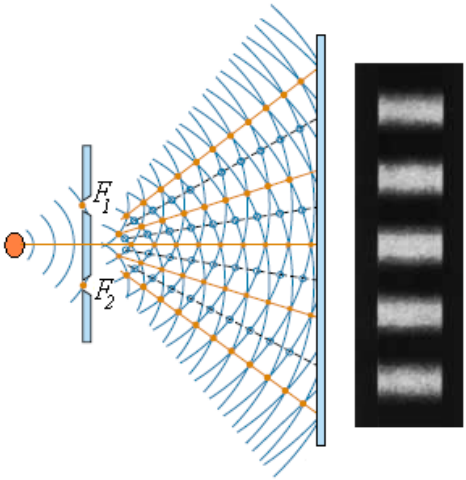

Figura 3.66: Luz atravessando os orifícios F_1 e F_2.

A superposição das ondas emitidas em F_1 e F_2 originará uma figura de interferência, onde pode-se observar regiões claras e regiões escuras. As regiões escuras correspondem às regiões onde as ondas luminosas se interferem destrutivamente e as regiões claras onde as ondas interferem construtivamente. As faixas claras e escuras são denominadas franjas de interferência.

As franjas brilhantes se formam quando a crista de uma onda luminosa que veio de uma das fendas se superpõem simultaneamente, na tela, à crista de uma onda luminosa que veio da outra fenda. As franjas escuras se formam quando a crista de uma onda que veio de uma das fendas se superpõem simultaneamente ao ventre de outra onda luminosa oriunda da outra fenda.

Quando a luz passa por uma abertura que é grande, comparada ao seu comprimento de onda, ela projeta uma sombra regular, com uma fronteira bem definida entre a área iluminada e a área escura da sombra. Quando a luz atravessa uma fenda estreita, observa-se que a luz se difrata. Desaparece a fronteira nítida entre as áreas iluminadas e escura e as bordas não são bem

definidas.

Quando o experimento é realizado com duas fendas estreitas e próximas, os efeitos de interferência são faixas retangulares. Se forem utilizados 2 orifícios, como no experimento realizado anteriormente, os padrões se repetem, mas agora os mesmos têm formatos circulares (anéis).

3.48 Difração e Interferência da Luz 2

Objetivo

Analisar a difração e a interferência da luz.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 pena de galinha, 1 pente fino.

Montagem e Procedimento

Incida na parede a luz do laser e observe a formação de um único ponto. Coloque na frente do feixe a pena ou o pente fino e observe a formação de pontos luminosos próximos entre sí.

Análise e Explicação

Ao atravessar o pente fino ou a pena a luz do laser sofre difração. As linhas escuras são oriundas da interferência destrutiva das ondas e os pontos luminosos são resultantes das interferências construtivas.

3.49 Difração e Interferência da Luz 3

Objetivo

Analisar a difração e a interferência da luz.

Materiais Utilizados

1 lanterna, 1 anteparo branco, 1 pente com dentes finos.

Montagem e Procedimento

Coloque o pente na posição paralela e rente ao anteparo, e incida a luz da lanterna sobre ele. Observe a imagem formada dos dentes. Em seguida, mantendo a lanterna fixa, vá afastando o pente do anteparo e observe a formação da imagem de novos dentes, mais grossos que os do pente.

Um experimento semelhante é realizado aproximando o dedo polegar e o indicador de sua mão. Quando eles quase de tocam você observará uma linha escura aparecendo entre eles[17].

Análise e Explicação

Inicialmente a luz da lanterna incidente sobre o pente atravessa apenas as regiões entre os seus dentes. A imagem dos dentes falsos no anteparo é formada a partir da difração seguida de interferência da luz ao atravessar as fendas do pente.

[17] Essas linhas escuras também aparecem quando você olhar através dos dentes de um garfo, à medida que ele vai girando aos poucos.

3.50 Anéis de Interferência

Objetivo

Visualizar a formação de anéis de interferência luminosa.

Materiais Utilizados

1 lanterna, 1 parede.

Montagem e Procedimento

Ligue a lanterna e projete a sua luz na parede. Aproxime e afaste a lanterna da parede e observe a formação de anéis luminosos claros e escuros sobre ela.

Análise e Explicação

Os anéis luminosos claros e escuros são formados, respectivamente, pela interferência construtiva e destrutiva das ondas de luz. Isso ocorre porque a lanterna tem um espelho esférico e a luz reflete em diferentes pontos desse espelho. Dessa forma, as ondas de luz percorrem diferentes distâncias até chegar à parede.

Se a diferença entre os caminhos percorridos por 2 dessas ondas for um múltiplo inteiro de comprimento de onda λ, a interferência será construtiva e haverá anéis claros. Caso contrário haverá anéis cuja luminosidade varia entre o claro e o escuro.

A figura de interferência formada não é totalmente simétrica já que as ondas luminosas geradas pela fonte incandescente não possuem frequências únicas.

3.51 Mancha de Poisson

Objetivo

Verificar a formação de anéis de interferência luminosa.

Materiais Utilizados

1 lâmpada luminosa (ou 1 lanterna), 1 folha escura com orifício, 1 disco pequeno ou 1 esfera (no máximo $2cm$ de diâmetro), 1 pinça, 1 cilindro (mesmo diâmetro do disco), 1 anteparo (pode ser uma parede de cor clara).

Montagem e Procedimento

Faça a luz da lâmpada passar pelo orifício da folha, de modo a formar um feixe colimado, sendo que este incidirá no anteparo. Coloque o disco no caminho do feixe de luz, segurando-o com a pinça e veja o que se forma no anteparo. A sombra de um pequeno disco ou esfera apresenta uma mancha brilhante no centro. Os objetos maiores, no entanto, apresentam apenas uma sombra escura.

Em seguida coloque o cilindro antes do disco e verifique a existência não só de uma mancha central brilhante na sombra do disco ou esfera, como também a existência de muitos anéis escuros e brilhantes, dispostos de maneira alternada. A figura formada é conhecida como mancha de Poisson (Fig.3.67).

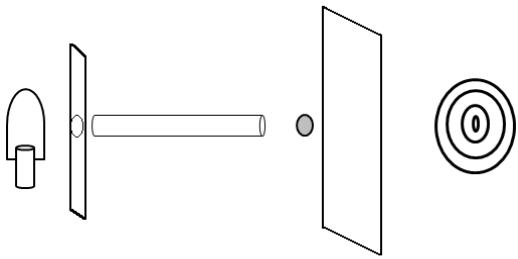

Figura 3.67: Mancha de Poisson.

Análise e Explicação

Os anéis são formados pela difração da luz produzida na esfera ou no disco. A luz que passa por um lado da esfera ou disco interfere com a luz que passa pelo outro lado, originando anéis claros e escuros no anteparo. O centro da figura aparece iluminado porque ele está equidistante dos dois lados e os raios de luz aí chegam em fase, interferindo construtivamente.

3.52 Ranhuras de um CD

Objetivo

Determinar a espessura das ranhuras de um cd através do fenômeno da difração.

Materiais Utilizados

1 cd (gravado e não mais útil), 1 fita adesiva, 1 ponteira laser (com λ conhecido, o qual geralmente vem impresso no laser), 1 prendedor de roupa, 1 trena.

Montagem e Procedimento

O cd (ou dvd) gravado contém muitas trilhas próximas que refletem e difratam a luz, ocasionando a sua interferência. Através disso pode-se determinar a espessura das ranhuras nele contidas.

Retire o revestimento superior do cd com o auxílio da fita adesiva, grudando e desgrudando a fita no revestimento diversas vezes, numa pequena região. Prenda o disco com o prendedor de roupa e incida sobre ele o feixe de laser (a ponteira laser deve estar também bem firme) (Fig.3.68). O cd se comportará como um conjunto de fendas paralelas, denominada rede de difração de transmissão.

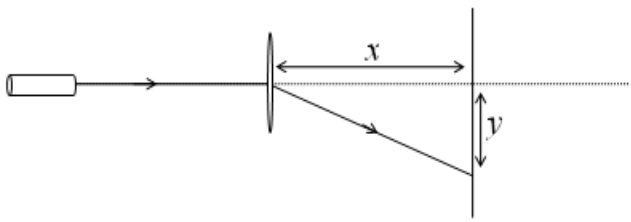

Figura 3.68: Luz laser incidindo no cd.

Quando a radiação incidente reflete nas trilhas do cd elas se individualizam em raios discretos que se refletem e se dispersam, formando uma rede

de difração. Conhecendo o comprimento de onda (λ) da luz do laser[18] e medindo a distância do cd até a parede (x) e a distância do eixo central ao 1° máximo (y) (pode ser o 2° ou 3°), determine a espessura das trilhas do cd.

Análise e Explicação

Difração é a propriedade que uma onda possui de contornar um obstáculo ou uma fenda, atingindo uma região que não poderia ser atingida se a propagação dessa onda fosse retilínea. A difração ocorre quando uma onda atravessa uma fenda ou um orifício de mesma ordem de grandeza de seu comprimento de onda.

Um fenômeno de difração pode ser seguido por um fenômeno de interferência, onde as ondas difratadas interferem entre si, gerando pontos de máximo e mínimo. A interferência é mais facilmente visível quando utilizado uma fonte de luz monocromática e coerente, como um laser. Uma luz é monocromática quando apresenta um único comprimento de onda e coerente quando as ondas geradas possuem a mesma fase no decorrer do espaço e do tempo.

Um cd tem $12cm$ de diâmetro, $1,2mm$ de espessura e um buraco no centro de $15mm$ de diâmetro. No cd há apenas uma faixa e todos os dados estão colocados numa espiral, perfazendo cerca de 20.000 trilhas e um total de $4,5km$. Como o espaço entre as trilhas está na faixa do comprimento de onda da luz visível, o cd consegue provocar a difração da mesma[19].

Um feixe de luz plana (conjunto de ondas planas) está incidindo sobre um anteparo, no qual há duas fendas estreitas[20]. Cada frente de onda passa através das fendas e atinge um anteparo e juntas formam um padrão de interferência.

Considere o ponto P no anteparo da Fig.(3.69-a). Para se ter um ponto de máximo em P, os 2 raios que saem das fendas devem chegar em fase. Para isso, a diferença de percurso (a) entre os 2 feixes deve conter um número

[18] O laser utilizado pelo autor neste experimento tinha $\lambda = 650nm$.

[19] O espaçamento entre as linhas no cd é de $1,6\mu m$ e no dvd é $0,74\mu m$.

[20] Para que o espaçamento entre as franjas de luz visível seja perceptível é necessário que a distância entre as fendas seja da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz.

inteiro (m) de comprimentos de onda (λ), de modo que:

$$a = m\lambda \tag{3.14}$$

com $m = 0, 1, 2, ...$

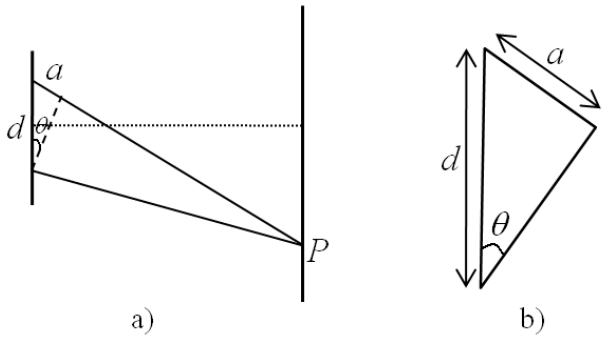

Figura 3.69: a- Ponto P sendo atingido por 2 feixes de luz; b- Relação trigonométrica.

De acordo com a relação trigonométrica na Fig.(3.69-b):

$$sen\theta = \frac{a}{d} \tag{3.15}$$

Relacionando (3.14) e (3.15), tem-se que, para ocorrer um ponto de máximo:

$$dsen\theta = m\lambda \tag{3.16}$$

com $m = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ Cada ponto de máximo acima do eixo central possui um ponto de máximo simétrico abaixo dele.

Veja o esquema da Fig.(3.70), onde um feixe de laser difratado incide na tela fazendo um ângulo θ com o eixo horizontal.

Sendo $\sqrt{x^2 + y^2}$ a hipotenusa do triângulo retângulo formado, tem-se que:

$$sen\theta = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{3.17}$$

Relacionando as Eqs.(3.16) e (3.17) encontra-se que o valor da espessura (d) da trilha é determinado a partir da expressão:

$$d = \frac{m\lambda\sqrt{x^2 + y^2}}{y} \tag{3.18}$$

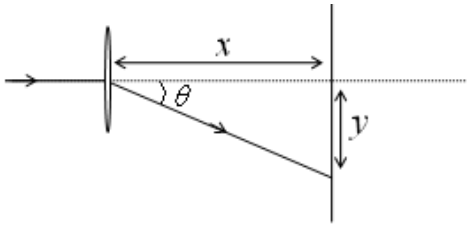

Figura 3.70: Feixe de luz difratada incidindo na tela sob um ângulo θ com a horizontal.

3.53 Diâmetro de um Fio de Cabelo

Objetivo

Determinar o diâmetro de um fio de cabelo através do fenômeno da difração.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser (com λ conhecido), 1 fio de cabelo, 2 prendedores de roupa, 1 suporte, 1 régua (ou 1 trena), 1 anteparo (ou 1 parede branca).

Montagem e Procedimento

Utilizando os 2 prendedores de roupa (ou algum objeto com a mesma função) prenda o fio de cabelo nas duas extremidades, e firme o conjunto no suporte. Deixando o laser numa posição fixa, incida a luz deste sobre o fio de cabelo.

Ao incidir sobre o fio a luz sofrerá difração, abrindo-se como em um leque. Ocorrerá a formação de uma figura de interferência sobre o anteparo, neste caso aparecendo sob a forma de pontos luminosos.

Medindo a distância entre o fio de cabelo e a parede (x) e a distância entre o eixo central e os pontos de máximo (y) (pontos luminosos), determine o diâmetro do fio de cabelo estudado. No experimento geralmente é observado

no anteparo espectros de até 3 ordens. Repita o experimento com outros fios de cabelo e determine a suas espessuras.

Análise e Explicação

Medindo-se vários comprimentos para x e y para pontos de 1ª ordem ($m = 1$), obteve-se os dados que encontram-se na Tab.(3.3). O laser utilizado tinha luz vermelha com $\lambda = 638,8nm$.

Tabela 3.3: Valores de x, y e d na difração de um fio de cabelo.

$x(cm)$	$y(cm)$	$d(\mu m)$
$296,8$	$3,000$	$63,20$
$235,6$	$2,325$	$64,73$
$215,4$	$2,250$	$61,16$
$198,5$	$1,800$	$70,45$
$182,4$	$1,650$	$70,62$
$174,6$	$1,675$	$66,59$
$165,9$	$1,575$	$67,29$
$154,8$	$1,450$	$68,20$

Para determinar o valor da espessura do fio de cabelo o procedimento é semelhante ao desenvolvimento no Exp.(3.52), utilizando a Eq.(3.18). Na Tab.(3.3) tem-se o valor do diâmetro (espessura) do fio de cabelo (em μm) para cada par de dados experimentais. Fazendo uma média dos valores de d encontra-se $d = 66,53\mu m$.

A espessura de um fio de cabelo varia, pois existem fios mais grossos e fios mais finos. O diâmetro geralmente varia entre $50\mu m$ e $100\mu m$.

3.54 Índice de Refração de Líquidos

Objetivo

Determinar o índice de refração da água com base no índice de refração do ar.

Materiais Utilizados

1 ponteira laser, 1 pedaço de cd (gravado), fita adesiva, 1 pedaço de papel, 1 recipiente de plástico transparente, água (bem limpa), 1 régua.

Montagem e Procedimento

Retire a película metálica do pedaço de cd com o auxílio da fita adesiva, de modo a obter uma rede de difração por transmissão. Ao passar pelo cd a luz do laser sofrerá difração, já que ele é constituído por trilhas circuncêntricas ao disco com espaçamento da ordem de $1,6\mu m$, onde são guardados os dados.

Com a fita adesiva prenda o pedaço de papel na lateral externa do recipiente plástico, o qual servirá de anteparo para a incidência de luz. No outro lado do recipiente prenda o pedaço de cd, como mostra a Fig.(3.71). Coloque água no recipiente até que o nível fique na metade do pedaço de cd.

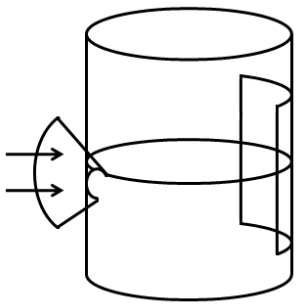

Figura 3.71: Pedaço de cd grudado no recipiente com água.

Incida a luz laser perpendicularmente à superfície do cd, de modo que ela cruze o ar. Observe a formação de pontos brilhantes no papel (anteparo). Com a régua meça a distância y entre o ponto central e o primeiro ponto ao lado (distância entre o máximo central e a primeira ordem de difração). Repita o mesmo procedimento fazendo a luz do laser cruzar a água antes de incidir refratada no anteparo. Meça a distância x entre o cd e o anteparo (3.72).

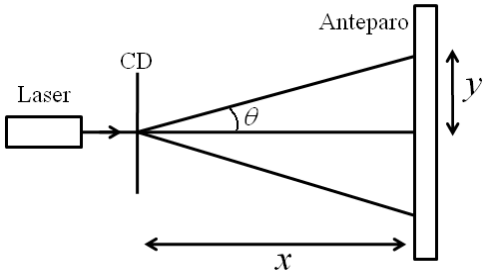

Figura 3.72: Luz do laser passando pelo cd e incidindo no anteparo.

Relacionando os valores de x e y para os meios ar e água, e considerando $n_{ar} \cong 1$, encontre o valor do índice de refração da água ($n_{água}$), ou de outro líquido se for usado.

Análise e Explicação

A equação de uma rede de difração na qual ocorre difração e interferência máxima é dada por:

$$dsen(\theta) = m\lambda$$

onde d é a constante da rede de difração (neste caso, para o cd $d = 1,6\mu m$), λ o comprimento de onda da luz laser incidente, θ o ângulo entre o raio de luz de ordem m e o raio central, e m a ordem (neste experimento considera-se apenas $m = 1$). Dessa forma, para os dois meios tem-se que:

$$dsen(\theta_{ar}) = \lambda_{ar} \tag{3.19}$$

$$dsen(\theta_{água}) = \lambda_{água} \tag{3.20}$$

Dividindo (3.19) por (3.20):

$$\frac{sen(\theta_{ar})}{sen(\theta_{água})} = \frac{\lambda_{ar}}{\lambda_{água}} \tag{3.21}$$

Através do esquema da Fig.(3.72) pode-se escrever $sen\theta$ para os dois meios através das relações trigonométricas:

$$sen(\theta_{ar}) = \frac{y_{ar}}{\sqrt{y_{ar}^2 + x^2}} \tag{3.22}$$

$$sen(\theta_{água}) = \frac{y_{água}}{\sqrt{y_{água}^2 + x^2}} \tag{3.23}$$

Dividindo (3.22) por (3.23):

$$\frac{sen(\theta_{ar})}{sen(\theta_{água})} = \frac{y_{ar}\sqrt{y_{água}^2 + x^2}}{y_{água}\sqrt{y_{ar}^2 + x^2}} \tag{3.24}$$

Igualando as Eqs.(3.21) e (3.24), obtem-se:

$$\frac{\lambda_{ar}}{\lambda_{água}} = \frac{y_{ar}\sqrt{y_{água}^2 + x^2}}{y_{água}\sqrt{y_{ar}^2 + x^2}} \tag{3.25}$$

Se a fonte de laser usada for a mesma, a frequência da luz não se altera ao se propagar na água ou no ar, de modo que $f_{ar} = f_{água}$. Sendo $f = v/\lambda$, pode-se escrever para os dois meios: $v_{ar}/\lambda_{ar} = v_{água}/\lambda_{água}$, ou:

$$\frac{\lambda_{água}}{\lambda_{ar}} = \frac{v_{água}}{v_{ar}} \tag{3.26}$$

O índice de refração da luz num meio é definido como $n = c/v$, onde c é a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade da luz no meio. Sendo $v_{água} = c/n_{água}$ e $v_{ar} = c/n_{ar}$, pode-se escrever (3.26) como:

$$\frac{\lambda_{água}}{\lambda_{ar}} = \frac{n_{ar}}{n_{água}} \tag{3.27}$$

Considerando $n_{ar} = 1$, a partir de (3.27) vem que:

$$n_{água} = \frac{\lambda_{ar}}{\lambda_{água}} \tag{3.28}$$

Relacionando (3.28) com (3.25) tem-se que o índice de refração da água é:

$$n_{água} = \frac{y_{ar}\sqrt{y_{água}^2 + x^2}}{y_{água}\sqrt{y_{ar}^2 + x^2}}$$

Fazendo medidas experimentais precisas obtêm-se um valor de $n_{água}$ próximo de $1,33$.

3.55 Cores nas Poças de Óleo e nas Películas de Sabão

Objetivo

Estudar a formação das cores nas poças de óleo e nas películas de sabão.

Materiais Utilizados

Óleo diesel (pequena quantidade), água, sabão.

Montagem e Procedimento

Espalhe um pouco de água sobre uma superfície e sobre a água pingue pequenas gotas de óleo diesel. Observe a formação de manchas coloridas. Faça algumas bolhas de sabão e perceba que, quando iluminadas as bolhas também apresentam-se coloridas. Mas por que é que as poças de óleo e as bolhas de sabão apresentam cores.

Análise e Explicação

Os espectros de cores produzidos numa bolha de sabão e numa poça de óleo são oriundos da interferência de ondas luminosas e este fenômeno é chamado de iridescência. Ele é observado em películas delgadas transparentes.

Quando a luz incide sobre essa película de óleo, por exemplo, parte dela sofrerá reflexão e parte será transmitida através do óleo. A luz transmitida através do óleo poderá sofrer nova reflexão na interface de separação óleo-água e retornar para o ar. Os 2 feixes luminosos emergentes da película de óleo sofrerão interferência entre sí (Fig.3.73). As faixas coloridas são vistas porque a espessura da película de óleo é variável.

A diferença de caminho percorrido pelos raios do feixe incidente e a inversão de fase na reflexão da superfície externa podem proporcionar interferências construtivas e destrutivas entre eles, formando manchas multicoloridas na superfície.

O fato de a interferência ser construtiva ou destrutiva depende de certos fatores, como o comprimento de onda da luz incidente, do índice de refração

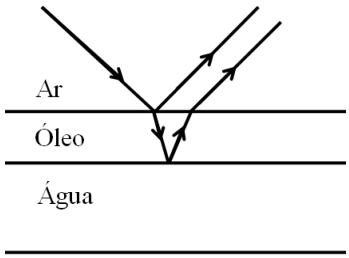

Figura 3.73: Reflexão, refração e interferência de um feixe de luz incidindo sobre uma poça de óleo.

da película e do percurso da luz no interior da película. À medida que as películas vão ficando mais espessas, a interferência vai gerando cores de maiores comprimentos de onda.

Uma bolha de sabão parece iridescente sob luz branca quando a espessura da película de sabão for aproximadamente igual ao comprimento de onda da luz. As ondas luminosas refletidas nas superfícies externa e interna da película percorrem distâncias diferentes. Quando a película é iluminada com luz branca, pode ocorrer de a película ter a espessura exata numa região para causar interferência destrutiva da luz amarela, por exemplo. Quando a luz amarela é subtraída da luz branca, a mistura restante aparecerá com a cor complementar ao amarelo, que é o azul. Noutro lugar em que a película é mais fina, uma outra cor poderá ser cancelada pela interferência, e formar-se-ão cores diferentes.

3.56 Ilusão de Óptica

Objetivo

Verificar uma ilusão de óptica.

Materiais Utilizados

1 folha de papel com o desenho proposto na Fig.(3.74), 1 régua.

Montagem e Procedimento

Veja os desenhos na Fig.(3.74).

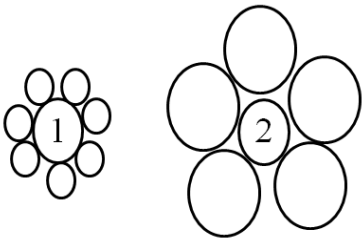

Figura 3.74: Ilusão de óptica.

Observe os círculos do meio (círculos 1 e 2). Qual deles é maior? A principio parece que é o 1. Pegue a régua e meça o diâmetro dos círculos 1 e 2. Constate que eles possuem o mesmo tamanho.

Análise e Explicação

Olhando os desenhos tem-se a impressão que o círculo 1 é maior que o círculo 2. Isso ocorre devido aos comparativos que o cérebro faz com os círculos da redondeza, já que o círculo 1 está rodeado por círculos menores que ele e o círculo 2 está rodeado por círculos maiores.

3.57 Furo na Palma da Mão

Objetivo

Criar uma ilusão de óptica.

Materiais Utilizados

1 tubo de papel ou papelão (o qual pode também ser feito enrolando uma folha de ofício.

Montagem e Procedimento

Aproxime o tubo num dos seus olhos, o olho esquerdo, por exemplo. Tape o olho direito com a mão direita e vá afastando-a lentamente, permanecendo com o tubo no olho esquerdo. Num dado momento você verá surgir um furo no meio (mais para o lado interno) da sua mão.

Análise e Explicação

O que ocorre aqui é uma ilusão de óptica. Inicialmente o olho esquerdo vê o interior do tubo e o olho direito vê a palma da mão. Quando os 2 olhos passam a enxergar simultaneamente vê-se o buraco do tubo na palma da mão.

3.58 Levitação Virtual

Objetivo

Construir um dispositivo que possibilite criar uma levitação ilusória.

Materiais Utilizados

1 espelho plano, 1 cubo de sarrafos[21] (este pode ser construído utilizando 8 sarrafos iguais[22]), 1 pessoa (você mesmo).

Montagem e Procedimento

O espelho deve ter dimensões tais que encaixe na diagonal do cubo, como na Fig.(3.75). Além disso, ele deve ter uma altura um pouco maior que a altura até o joelho da pessoa que irá utilizá-lo.

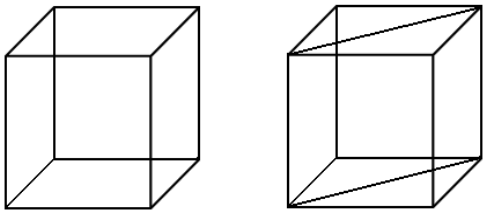

Figura 3.75: Espelho colocado na diagonal do cubo.

Entre no cubo e coloque uma perna de cada lado do espelho. Suspendendo o peso na perna de trás, levante um pouco a perna que está na frente do espelho. Para quem está olhando de longe e não sabe da existência do espelho parece que a pessoa está simplesmente levitando.

Análise e Explicação

A ilusão apresentada ocorre devido ao fato de o espectador não ver a perna atrás do espelho que sustenta o corpo da pessoa. O que ele vê é a perna

[21] Sarrafos são tiras compridas e estreitas de madeira, uma espécie de ripa.

[22] Na verdade há uma pequena diferença de comprimento para fazer os encaixes.

da pessoa que está na frente e a sua imagem virtual formada pelo espelho plano. Não há como distinguir a imagem virtual da imagem real.

As pessoas geralmente têm corpos quase simétricos, daí a impressão de que a imagem formada completa a parte do corpo que falta (a perna), que fica escondida atrás do espelho.

3.59 Visão Tridimensional

Objetivo

Realizar um experimento simples que demonstre que a nossa visão é tridimensional.

Materiais Utilizados

1 pessoa (você mesmo).

Montagem e Procedimento

Coloque o dedo indicador de sua mão a cerca de $10cm$ de distância dos seus olhos. Olhe para o dedo primeiro com um olho e depois com o outro, sempre segurando o outro olho fechado, sem mover a cabeça. Veja como a região encoberta pelo dedo é diferente. Isso mostra que cada olho enxerga um objeto (ou qualquer outra coisa) sob um ângulo diferente do outro.

Análise e Explicação

O que um olho vê é sempre um pouco diferente do que o outro vê. Essa diferença contribui para que a gente consiga ver os objetos em 3 dimensões, apesar de as imagens geradas no cérebro serem planas. O cérebro funde essas imagens e gera uma imagem tridimensional.

O cristalino do nosso olho é uma lente convergente que focaliza a luz que nele entra, formando imagens na retina. A distância focal do cristalino é modificada por movimentos de um anel de músculos, permitindo ajustar a visão para objetos próximos ou distantes.

A convergência correta do cristalino faz com que a imagem de um objeto, formada na retina, fique nítida e bem definida. A imagem formada na retina é real e invertida, mas isso não tem importância, já que todas as imagens formadas são inversas e o cérebro se adapta a isso desde o nosso nascimento.

3.60 Pêndulo de Pulfrich

Objetivo

Criar uma ilusão de óptica relativa ao movimento de um pêndulo.

Materiais Utilizados

1 óculos de sol, 1 pêndulo.

Montagem e Procedimento

Coloque o pêndulo a oscilar num determinado plano. Olhe o movimento do pêndulo de longe, de modo que o seu plano de oscilação seja perpendicular à sua linha de visão (Fig.3.76). A seguir, coloque um dos vidros do óculos na frente de um dos seus olhos. Mantendo os dois olhos abertos (um olhando diretamente e o outro através do óculos escuro) você verá o pêndulo descrever um movimento cônico, girando em círculo enquanto oscila. Colocando o óculos no outro olho você verá o pêndulo girar noutro sentido (Fig.3.76).

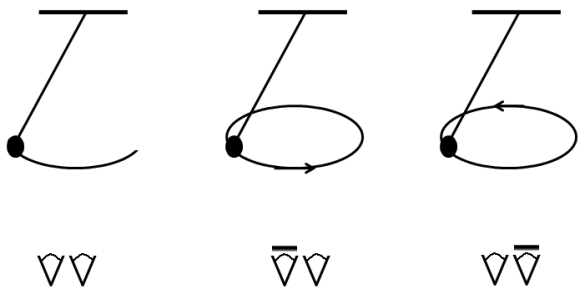

Figura 3.76: Pêndulo de Pulfrich.

Análise e Explicação

Este experimento consiste numa ilusão de óptica, cuja explicação foi dada em 1922 pelo físico alemão Carl Pulfrich. Segundo ele, a imagem que se

forma na retina do olho que possui o óculos escuro na sua frente, chega ao cérebro um pouco depois da imagem mais brilhante formada na retina do outro olho (sem o óculos escuro). O cérebro interpreta esse atraso como um deslocamento do objeto, que se aproxima ou se afasta do observador, criando a ilusão de um movimento de rotação.

3.61 Espalhamento da Luz - As Cores do Céu

Objetivos

Demonstrar o espalhamento de luz por partículas em suspensão e explicar as cores do céu.

Materiais Utilizados

1 lanterna (com feixe de luz colimado), 1 caixa de plástico transparente (ou recipiente grande de vidro), 1 anteparo branco, água, leite em pó (ou pó de giz).

Montagem e Procedimento

Coloque água no recipiente e faça a luz colimada da lanterna passar por ela, sendo projetada no anteparo que fica no lado oposto. Adicione um pouco de leite em pó na água e mexa bem. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(3.77).

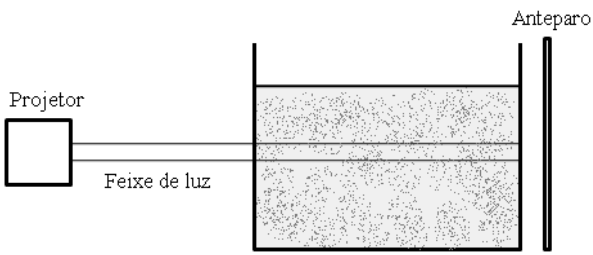

Figura 3.77: Luz incidente sobre a água.

Esperando a água se acalmar você verá a luz projetada no anteparo numa coloração um pouco avermelhada. Olhando a água de lado à direção do feixe, você verá a luz em um tom mais azulado. Para melhor visualização é recomendado realizar a experiência num local um pouco escuro.

Análise e Explicação

A luz da lanterna, que é uma luz branca semelhante à luz do sol, é constituida de uma mistura de todas as cores visíveis, cada qual com seu comprimento de onda. Quando a luz atravessa um meio que tem partículas suspensas, ela é espalhada por tais partículas. E esse espalhamento depende do comprimento de onda da luz e do tamanho das partículas.

Neste experimento a luz azul (menor comprimento de onda) é mais espalhada pelas partículas de leite na água que a luz vermelha (maior comprimento de onda). Por isso, a luz vermelha se projeta no anteparo e a luz azul é espalhada para os lados.

Fenômeno semelhante ocorre com a luz do sol que atinge o planeta terra. Quando atravessa a atmosfera, a luz do sol é espalhada pelas partículas do ar ou poeira nele suspensa, sendo a cor azul mais espalhada que a luz vermelha[23]. Por isso é que vemos o céu azul.

A luz do sol é uma mistura de radiações eletromagnéticas, cujos comprimentos de onda variam principalmente desde o ultravioleta até o infravermelho. As radiações eletromagnéticas são formadas por campos elétricos e magnéticos que oscilam no decorrer do tempo. Quando a radiação incide num material, o campo elétrico faz vibrar as suas cargas elétricas, e como resultado a radiação é refletida em todas as direções. Esse processo chama-se espalhamento.

As moléculas da atmosfera vibram sob a ação do campo elétrico oscilante da onda de luz e a amplitude de vibração será tanto maior quanto mais próxima a frequência da luz estiver da frequência natural de vibração da molécula. As frequências mais altas da luz visível estão mais próximo da frequência natural, e por isso as cores azuladas são as mais espalhadas pela atmosfera. Se a terra não tivesse atmosfera o céu diurno seria completamente escuro.

Durante o dia as cores azul e violeta são espalhadas em todas as direções e incidem de forma predominante nos nossos olhos, fazendo-nos perceber o céu na tonalidade azul. Já, durante o amanhecer ou anoitecer, o céu apresenta-se com uma coloração avermelhada.

Quando o sol está nascendo ou se pondo, se encontrando próximo ao

[23] A luz azul é espalhada cerca de 10 vezes mais que a luz vermelha.

horizonte, a luz por ele emitida atravessa uma faixa mais longa da atmosfera que no restante do dia. Nesses períodos o céu fica mais avermelhado porque o azul é difundido logo nas primeiras camadas de entrada da luz e o que chega aos nossos olhos são, principalmente, as radiações de baixa frequência (vermelho, amarelo, etc.), difundidas por partículas sólidas em suspensão nas camadas baixas da atmosfera.

3.62 Decomposição da Luz 1

Objetivo

Verificar a decomposição da luz branca ao passar por um prisma.

Materiais Utilizados

1 prisma, 1 fonte de luz branca (1 lanterna ou a luz do sol, com feixe colimado), 1 anteparo (uma parede).

Montagem e Procedimento

Num ambiente escurecido, faça um feixe colimado de luz branca incidir numa superfície lateral do prisma, deixando que ela seja projetada no anteparo. Veja a formação de um espectro de cores. Um esquema da montagem do experimento está na Fig.(3.78).

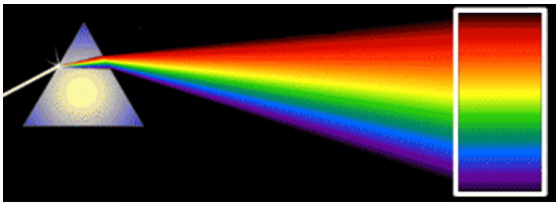

Figura 3.78: Decomposição da luz branca num prisma.

Análise e Explicação

A luz visível compreende uma faixa estreita do espectro eletromagnético e abrange o conjunto de ondas eletromagnéticas que, ao penetrar em nossos olhos, sensibiliza a retina. A luz visível é oriunda de transições dos elétrons no átomo. Quando recebe energia os elétrons excitam-se e passam a ocupar níveis energéticos mais altos no átomo. Ao retornarem aos níveis energéticos originais, a energia recebida é devolvida na forma de luz visível.

O comprimento de onda λ da luz visível fica compreendido na faixa entre $4,0.10^{-7}m$ e $7,5.10^{-7}m$. Considerando que a velocidade de propagação da luz é de $3,0.10^{8}m/s$, pela equação $c = \lambda f$ obtém-se que os valores correspondentes de frequências da luz visível está na faixa[24] entre $7,5.10^{14}Hz$ e $4,0.10^{14}Hz$.

Como as frequências das ondas do espectro eletromagnético variam de modo contínuo, tem-se nessa faixa do espectro um amplo número de frequências, o que corresponde a um grupo grande de cores. Nesse meio contínuo destacam-se 7 regiões, que são as cores que podem ser vistas em um arco-íris, as quais citamos em ordem crescente de frequência: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil, violeta.

A luz branca resulta da superposição das muitas cores do espectro visível. A decomposição da luz branca ao passar por um prisma é explicada pela diferença no valor da velocidade de propagação de cada luz colorida em meios materiais, sendo que essa velocidade aumenta do violeta para o vermelho. Se muda a velocidade de propagação da luz no meio materiais, muda o índice de refração n (n é definido como $n = c/v$) o que faz com que ela sofra refração sob um determinado ângulo, de acordo com a lei de Snell-Descartes:

$$n_1 sen\theta_1 = n_2 sen\theta_2$$

onde n_1 é o índice de refração do meio, θ_1 o ângulo de incidência, n_2 o índice de refração do meio 2 e θ_2 o ângulo de refração.

[24]Essa faixa de frequência é bem estreita quando comparada com todo o espectro eletromagnético, cujas frequências variam entre $10^{1}Hz$ e $10^{25}Hz$.

3.63 Decomposição da Luz 2

Objetivo

Verificar a decomposição da luz branca ao incidir sobre um cd ou dvd.

Materiais Utilizados

1 fonte de luz branca (1 lanterna ou a luz do sol), 1 cd ou 1 dvd gravado.

Montagem e Procedimento

Deixe a luz incidir sobre o cd ou dvd, inclinando-o de modo que ele receba a luz num ângulo favorável. Veja as diversas cores formadas.

Análise e Explicação

O cd e o dvd comportam-se como uma rede de difração onde as linhas ou fendas são substituídas por ranhuras refletoras que interferem entre si. Embora, a rigor, não haja difração, pois a luz não atravessa nenhuma fenda ou contorna algum obstáculo, essas superfícies costumam ser chamadas de redes de difração[25] porque produzem o mesmo efeito.

A radiação incidente reflete nas trilhas do cd ou dvd e se individualiza em raios discretos que se dispersam, acabando por interferirem entre si. Por isso que ao incidir luz branca sobre a superfície espelhada do cd ou dvd ocorre a formação de diversas cores.

[25] Mais precisamente são chamadas de redes de difração de reflexão.

3.64 Disco de Newton

Objetivo

Verificar que a luz branca é proveniente da soma de todas as cores.

Materiais Utilizados

1 disco de papelão, 1 disco de papel branco (mesmo diâmetro que o disco de papelão), 1 conjunto de lápis de cor, 1 régua, cola, barbante, 1 tesoura.

Montagem e Procedimento

Com a régua reparta o disco de papel em 7 setores iguais e pinte cada um deles com as seguintes cores, que são as cores do arco-íris: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil, e violeta (não precisa ser na sequência)[26]. Cole o disco de papel no disco de papelão, para que ele fique firme. Este disco é conhecido como disco de Newton e está representado na Fig.(3.79).

Figura 3.79: Disco de Newton.

Para colocar o disco a girar você pode acoplá-lo à algum equipamento elétrico ou então formar uma espécie semelhante ao brinquedo infantil chamado corrupio, o qual consiste em provocar rotação num disco através de barbantes. Neste ultimo caso, faça 2 furos no disco (próximos ao seu centro e simétricos) e passe por eles um barbante. Torcendo e esticando o barbante

[26]Pode-se também fazer o disco com 6 cores, excluindo o violeta, que funciona da mesma forma.

consegue-se imprimir rotação ao disco (3.80). Colocando o disco para girar você verá ele num tom de branco.

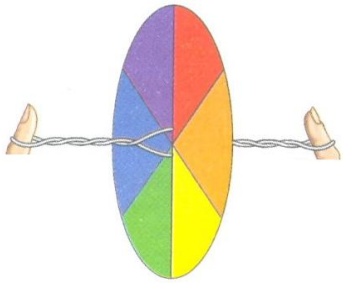

Figura 3.80: Esquema do corrupio.

Análise e Explicação

O disco de Newton é um dispositivo utilizado para demonstrar a composição de cores. Tem esse nome devido ao fato de ter sido Isaac Newton o responsável pela descoberta de que a luz branca do sol é composta pelas cores do arco-íris.

Este experimento é um método simples de mostrar que a cor branca é composta por diversas cores. O disco em rotação torna-se branco devido ao fato de nosso olhos, ao serem sensibilizados pela luz proveniente de um determinado objeto, conservam esta imagem durante cerca de $0,15s$. Quando ocorre a superposição de duas ou mais imagens num intervalo de tempo igual ou menor que o tempo comentado, tem-se a sensação de continuidade. O próprio Newton propôs o disco dividido em 7 partes, cujas áreas correspondem proporcionalmente às cores do arco-íris.

Ao girar o disco ele não se torna totalmente branco pois ele não consegue reproduzir todas as cores do arco-íris. Na verdade é incorreto dizer que o arco-íris tem 7 cores, pois as faixas coloridas não estão separadas uma das outras. O que realmente existe é uma continuidade de cores no arco-íris.

3.65 Pião de Cores

Objetivo

Verificar que a luz branca é proveniente da soma de todas as cores.

Materiais Utilizados

1 pedaço circular de papelão, 1 palito de madeira, 1 pedaço de linha, 1 tubo vazio de caneta, discos coloridos (de acordo com um padrão).

Montagem e Procedimento

Faça um pequeno furo no centro do disco de papelão, encaixando-o no palito. Use fita adesiva para fixar o palito ao disco. Amarre uma ponta da linha no palito, próxima ao disco de papelão, e enrole-a no palito. Um esquema da constituição do pião está na Fig.(3.81).

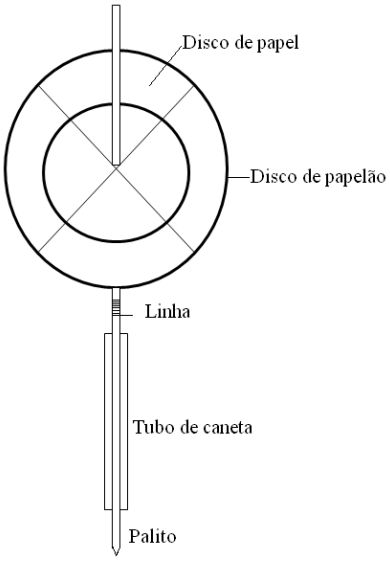

Figura 3.81: Pião de cores.

Gire várias vezes o palito para enrolar a linha. Coloque o palito dentro do tubo da caneta. Segurando o tubo puxe a linha para fazer o pião girar. O movimento é de vai-e-vem, uma espécie de iôiô. Cole os discos coloridos sobre o suporte e veja o que se forma. Na Fig.(3.82) temos dois esquemas de discos coloridos sugeridos. Fica melhor se pintado com giz de cera ou lápis de cor forte.

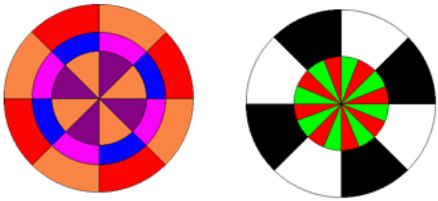

Figura 3.82: Pião de cores.

Análise e Explicação

Nossos olhos conseguem distinguir imagens diferentes apresentadas na sequência apenas se o intervalo de tempo entre uma imagem e a seguinte for superior a aproximadamente 100 milisegundos. Se a sucessão de imagens for muito rápida, não conseguimos enxergar cada imagem de forma nítida. Dessa forma, quando o disco com setores coloridos gira rapidamente, as cores se misturam no olho, dando a sensação da cor branca.

3.66 Disco Branco e Preto

Objetivo

Verificar uma ilusão óptica com cores brancas e pretas.

Materiais Utilizados

1 disco com cores brancas e pretas, dispostas conforme o esquema da Fig.(3.83).

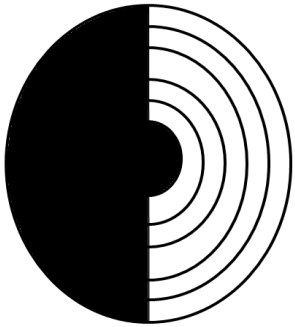

Figura 3.83: Disco branco e preto.

Montagem e Procedimento

Coloque o disco a girar. Você terá a sensação de ver cores.

Análise e Explicação

O olho humano tem pequenos receptores de luz, denominados cones e bastonetes. Os bastonetes detectam apenas diferenças entre claro e escuro e são muito mais sensíveis à luz do que os cones, que detectam cores.

Quando você olha diretamente para um objeto a luz penetra nos seus olhos e atinge uma região da retina onde predominam os cones, que são menos sensíveis à luz. Alguns tipos de cones respondem mais rapidamente do que outros e alguns deles respondem por mais tempo que os demais.

Essa ilusão de óptica está relacionada às diferentes respostas dos cones quando estimulados. As cores diferem ao longo do disco, já que os comprimentos dos arcos pretos variam com a sua posição, gerando assim diferentes frequências de lampejos na retina.

Ao olhar ligeiramente de lado para um objeto pouco iluminado, você pode percebê-los melhor, porque a luz proveniente do objeto atinge áreas da retina com um número muito maior de bastonetes. Ao girar, cada disco produz uma ilusão óptica específica.

3.67 Efeito Estroboscópico

Objetivo

Reproduzir e analisar o efeito estroboscópico.

Materiais Utilizados

1 televisor de tubo (tudo de raios catódicos), 1 ventilador.

Montagem e Procedimento

Posicione o ventilador diante da tela do televisor. Varie a sua velocidade e observe o que acontece com o movimento das suas pás.

Análise e Explicação

Nas telas dos televisores de tubos de raios catódicos a imagem é formada por feixes de elétrons, que rapidamente varrem a tela de cima para baixo e da esquerda para a direita. Cada elétron, ao chocar-se contra a tela recoberta com uma fina camada de fósforo, gera um ponto luminoso. Cada ponto da tela só emite luz quando é atingido por um feixe de elétrons, de modo que os pequenos flashes de luz são produzidos com uma certa frequência, o mesmo se passando com a tela como um todo.

Consideremos agora as pás de um ventilador iluminada por uma luz do tipo pisca-pisca (emitida pela tela do televisor). Se a frequência dessa luz for a mesma com que as pás dão voltas (número de voltas por segundo), as pás permanecerão imóveis. Se a frequência da luz for menor que a frequência das pás, nós vemos as pás girando numa velocidade menor, no mesmo sentido que ela gira. Se a frequência da luz for maior que a frequência das pás, as pás parecem girar para trás, já que a luz sempre acende antes de uma certa região das pás completar uma volta completa.

Nos dois casos tem-se a impressão de uma sequência de imagens em câmera lenta. Esse efeito óptico é chamado efeito estroboscópico.

3.68 Construindo um Arco-Íris

Objetivo

Estudar a formação do arco-íris.

Materiais Utilizados

1 fonte de água, 1 mangueira de água com esguicho, luz do sol intensa.

Montagem e Procedimento

Num dia ensolarado utilize a mangueira para esguichar a água numa região acima dos seus olhos, de modo que você fique entre a água e a luz do sol. Localize-se numa posição conveniente e observe a formação de um pequeno arco-íris.

Pode-se também fabricar um arco-íris projetando um feixe intenso de luz branca num copo de água na sua frente.

Análise e Explicação

O arco-íris é formado quando a luz do sol penetra nas gotículas de água e sofrem refração e reflexão, decompondo-se e atingindo a nossa visão. Veja a Fig.(3.84), a qual representa um esquema da formação do arco-íris.

Inicialmente a luz sofre refração quando penetra na gota. Devido ao fato da luz branca do sol ser composta por várias cores, cada uma delas sofre um desvio diferente. Desse modo, a luz solar sofre dispersão. Seguida à dispersão ocorre a reflexão total e novamente a refração quando a luz sai da gota. A cor que mais se desvia é a violeta (maior frequência) e a que menos se desvia é a vermelha (menor frequência).

O arco-íris é visto apenas quando as gotículas de água estão numa posição oposta à do sol em relação ao observador. Os ângulos que os raios dispersos fazem com a luz solar são bem definidos e dependem da cor da luz e da substância que forma a gotícula. A posição de cada gotícula determina se ela contribuirá ou não para a formação do arco-íris. Para contribuir as gotículas devem ficar na circunferência da base de um cone circular, cujas retas de

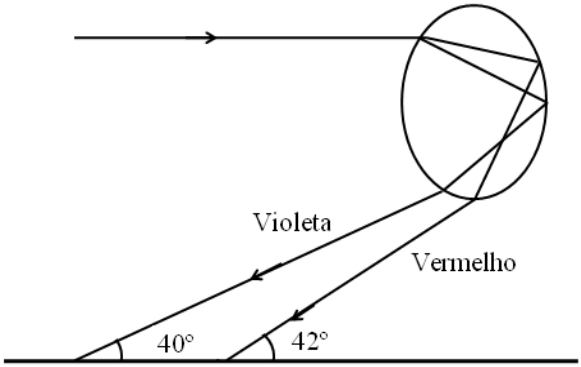

Figura 3.84: Esquema de formação do arco-íris.

maior inclinação ficam entre $40°$ e $42°$ em relação à luz do sol, como mostra o esquema da Fig.(3.85). O arco-íris tem sempre a mesma forma semicircular.

As outras cores do arco-íris situam-se em circunferências intermediárias, entre o violeta e o vermelho. As gotículas que estiverem fora dessas condições não contribuirão para a formação do arco-íris. Na verdade, existe uma infinidade de arco-íris, cada qual visto por um observador.

O arco-íris sempre apresenta luz violeta na parte mais interna e a vermelha na parte externa. Algumas vezes também se observa um arco-íris secundário, de menor intensidade, em que a posição das cores estão invertidas (o vermelho fica na parte interna e o violeta na parte externa). Este é formado pela luz que refletiu duas vezes na gotícula de água. A cor mais brilhante é o vermelho e a menos brilhante o violeta. O espaço entre os 2 arco-íris (quando aparece 2) é conhecido como faixa escura de Alexandre (homenagem ao seu descobridor Alexandre de Afrodisias), e é um pouco mais escura que o restante do céu.

As gotas que participam da formação do arco-íris podem estar desde alguns metros até vários quilômetros de distância do observador. No caso de um arco-íris próximo (como no experimento aqui realizado), cada olho vê o seu próprio arco-íris, ligeiramente deslocado um do outro.

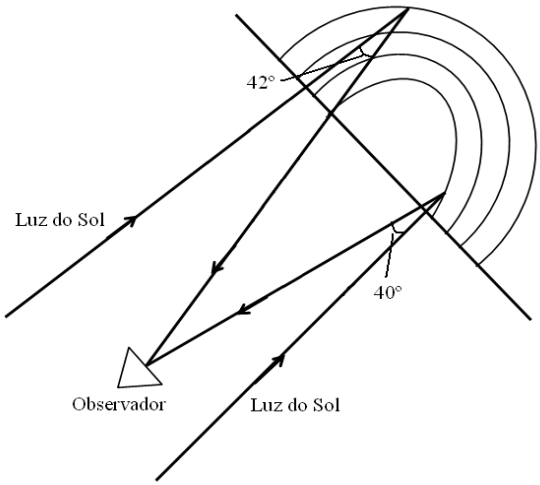

Figura 3.85: Formação do arco-íris e observador.

3.69 Estudo das Cores

Objetivo

Estudar as cores primárias e a formação das cores secundárias.

Materiais Utilizados

3 lâmpadas coloridas, com as cores primárias[27]: azul, vermelho e verde[28]., 1 parede branca, objetos coloridos.

Montagem e Procedimento

Num ambiente bem escurecido, foque cada luz primária na parede branca e veja o que se forma. Em seguida combine as luzes, aos pares, e visualize

[27] Aqui é importante diferenciar as cores luz primárias e as cores pigmento primárias. As cores luz primárias são o vermelho, o verde e o azul, enquanto as cores pigmento primárias são o vermelho, o azul e o amarelo.

[28] Se não tiver as lâmpadas coloridas, pode-se usar 3 lâmpadas comuns ou 3 lanternas, e envolvê-las com plásticos coloridos, de modo que elas produzam as cores citadas.

a formação das cores secundárias. Junte agora as três cores e veja a cor resultante.

Posteriormente faça incidir cada feixe de luz sobre objetos de diferentes cores e veja como eles se apresentam.

Análise e Explicação

A cor é uma interpretação fisiológica ao recebimento de uma luz de determinado comprimento. Essa habilidade depende do tipo de cones existentes nos olhos receptor, os quais permitem enxergar mais ou menos.

Se um corpo iluminado por luz branca (composta por muitas cores) mostra-se amarelo, por exemplo, é porque ele absorveu todas as cores, menos a amarela, que foi refletida de maneira difusa. Um pneu mostra-se preto porque absorve todas as cores, sem refletir nenhuma.

Imagine 2 corpos vistos sob luz branca, um vermelho e outro verde. Se estes forem colocados num ambiente iluminado somente com luz monocromática vermelha, o corpo vermelho se mostrará vermelho, pois é a cor que ele reflete, e o verde aparecerá na cor preta, pois ele absorve a cor vermelha e não reflete nenhuma outra.

A mistura de 2 cores primárias gera uma cor secundária:

azul + verde= ciano;

azul + vermelho= magenta;

verde + vermelho= amarelo.

Ao incidir junto na parede as cores azul, verde e vermelho, forma-se a cor branca.

3.70 Sombras Coloridas

Objetivo

Verificar a formação de sombras coloridas.

Materiais Utilizados

Lâmpadas coloridas (as mesmas do Exp.3.69).

Montagem e Procedimento

Projete as 3 luzes coloridas sobre uma parede branca e coloque a mão (ou outro objeto) na frente dos feixes de luzes. Perceba a formação de sombras coloridas. Desligue cada umas das luzes e veja como que se comportam as cores das sombras.

Análise e Explicação

Se for incidida uma luz de cor qualquer sobre um objeto, a sombra do mesmo será preta. Esta sombra desaparecerá se a região escura for iluminada com uma outra luz de mesma cor. No entanto, se a sombra for iluminada com alguma outra cor de luz, esta se tornará da cor desta nova luz.

As sombras coloridas são geradas pela interseção entre os feixes luminosos. Elas se formam subtraindo do branco a cor que é projetada, formando as cores complementares ciano, magenta e amarelo. Se for bloqueada todas as 3 cores ter-se-a uma sombra negra. Se for bloqueada 1 das 3 cores ter-se-a uma sombra cuja cor é uma mistura das 2 outras cores.

Por exemplo, se for desligada a luz vermelha a tela aparecerá ciano, e um objeto colocado entre as fontes de luz e a tela produzirá 2 sombras, sendo uma azul e a outra verde. Quando desliga-se a luz verde a tela aparecerá magenta e as sombras produzidas serão vermelho e azul. Se for desligada a luz azul, a tela irá aparecer amarela e as sombras formadas serão nas cores vermelho e o verde.

3.71 Efeito Albedo 1

Objetivo

Observar como superfícies de diferentes cores absorvem e refletem a luz do sol.

Materiais Utilizados

1 pedaço de tecido branco, 1 pedaço de tecido escuro (de preferência preto)[29], 1 tesoura, 2 termômetros.

Montagem e Procedimento

Com a tesoura corte um pedaço de cada tecido e enrole-os um em cada bulbo dos termômetros. Deixe os conjuntos por um tempo no sol ou sob fonte de luz intensa, como mostra a Fig.(3.86).

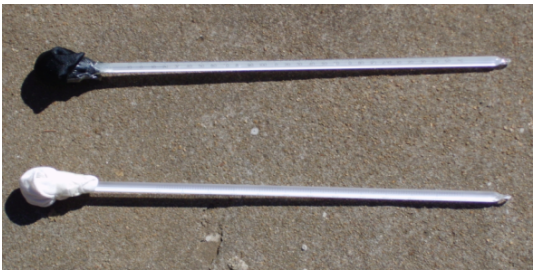

Figura 3.86: Termômetros ao sol.

Faça a leitura das temperaturas registradas nos termômetros e observe que o termômetro com o tecido escuro acusa maior temperatura que o termômetro claro.

Um procedimento parecido é colocar 2 tubos iguais, com mesma quantidade de água (ambas à mesma temperatura inicial) ao sol, sendo um coberto com um pano claro e o outro com um pano escuro. Depois de um certo tempo

[29] Os tecidos devem ser iguais, diferenciando apenas na coloração.

ao sol meça as temperaturas da água e constate que o recipiente coberto com pano escuro está com uma temperatura maior.

Análise e Explicação

A diferença de temperatura registrada pelos termômetros deve-se ao fato de que cada superfície absorve e reflete diferentes quantidades de radiação. A porcentagem da luz do sol que uma determinada superfície reflete é chamada albedo dessa superfície. Superfícies claras tem albedo alto e superfícies escuras tem albedo baixo.

O tecido escuro tem albedo baixo, o que significa que ele absorve uma grande quantidade de calor (reflete pouca radiação). No nosso experimento, isso fez com que ele aquecesse mais que o tecido branco.

A porcentagem de absorção de radiação solar em função da cor do material é: branco: 25%, amarelo: 45%, verde: 50% e preto: 97%.

3.72 Efeito Albedo 2

Objetivo

Observar como superfícies de diferentes cores absorvem e refletem a luz do sol.

Materiais Utilizados

1 lupa, 1 pedaço de isopor (em forma de placa), tinta preta, luz do sol intensa (ou 1 lanterna).

Montagem e Procedimento

Pinte com tinta preta uma pequena região da placa de isopor. Num dia de sol forte (ou utilize a lânterna) tente queimar o isopor com o auxílio da lupa. Faça incidir a luz por um certo intervalo de tempo no isopor branco e veja o que acontece. Em seguida faça incidir (pelo mesmo intervalo de tempo) a luz na região preta e compare os resultados.

Análise e Explicação

Focando a luz na região branca praticamente nada acontece, pois a quantidade de energia absorvida pela superfície branca é pequena. Quando incidida na região preta a luz queima o isopor. Isso porque a superfície preta absorve bem mais a radiação do que a superfície branca.

3.73 Efeito Albedo 3

Objetivo

Observar o efeito albedo.

Materiais Utilizados

2 latas de refrigerante, tinta preta, água quente (fervendo), água fria (gelada).

Montagem e Procedimento

Pinte a parede externa de uma das latas de preto e aguarde a tinta secar. Encha as duas latinhas com água quente e aguarde por alguns minutos. Apalpe as latas e perceba qual está mais quente. Faça o mesmo procedimento usando água fria. Por que ocorre essa diferença?

Análise e Explicação

A cor escura tanto aquece quanto esfria mais rapidamente. Outras explicações são dadas nos Exps.(3.71) e (3.72).

3.74 Polarização da Luz

Objetivo

Verificar o fenômeno da polarização da luz.

Materiais Utilizados

2 polaroides[30] (sendo que estes podem ser substituídos por 2 pares de óculos polarizadores).

Montagem e Procedimento

Coloque os polaroides encostados um na frente do outro e va girando um deles. Perceba que em certa situação a luz atravessa totalmente os polaroides (Fig.3.87-a). Quando os polaroides são girados 90° entre sí, a partir da situação anterior, não ocorre mais passagem de luz pelo conjunto (Fig.3.87-b).

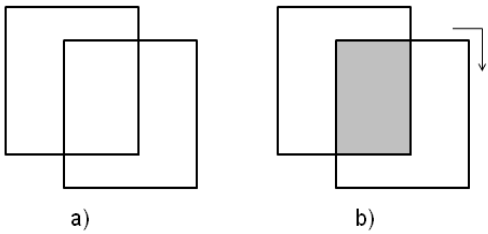

Figura 3.87: Orientação dos polaroides: a- A luz atravessa; b- A luz não atravessa.

Quando os filtros polaroides são usados aos pares, o primeiro deles é chamado de polarizador e o segundo de analisador.

Análise e Explicação

Uma onda eletromagnética, tal como a luz visível, é uma onda transversal, ou seja, ela vibra numa direção (que pode ser infinitas) e se propaga em outra, sendo que estas duas direções são perpendiculares entre si.

[30] Os polaroides também podem ser obtidos retirando telas de telefones celulares.

As ondas transversais podem ser polarizadas. Dessa forma, depois de atravessar um obstáculo que tenha a capacidade de polarizar uma onda, como um polaroide[31], a onda que antes oscilava em diversas direções, agora passa a oscilar somente numa direção, que é paralela ao plano de polarização do polaroide. Um polaroide funciona como uma grade que só permite a passagem das oscilações paralelas às fendas, como mostra o esquema da Fig.(3.88).

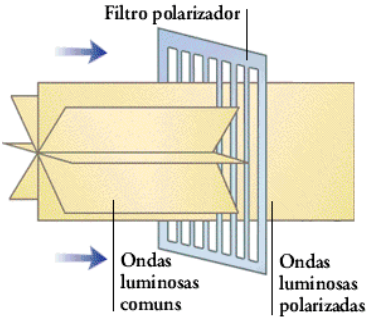

Figura 3.88: Luz sendo polarizada.

Quando o polarizador e o analisador são girados 90° entre sí, não ocorre mais passagem de luz pelo conjunto[32]. A luz polarizada no primeiro polaroide (polarizador) é esbarrada ao tentar atravessar o segundo (analisador), como mostra a Fig.(3.89).

O fenômeno da polarização ocorre somente com ondas transversais. A oscilação transversal, ao contrário da longitudinal, não define a direção em que as partículas do meio oscilam, já que elas podem oscilar em qualquer direção. Se a onda ultrapassar a fenda de um obstáculo, a direção de propagação das partículas oscilantes depois da ultrapassagem será única e paralela à fenda. Por isso diz-se que a onda está polarizada.

As ondas longitudinais não podem ser polarizadas porque oscilam na mesma direção da propagação. Inicialmente pensava-se que a luz fosse uma onda longitudinal. No entanto, com a descoberta da polarização e a consta-

[31] Existem também outros métodos para polarizar uma onda.

[32] De fato, alguma luz de comprimento de onda mais curto conseguirá atravessar, mas em um grau pouco significativo.

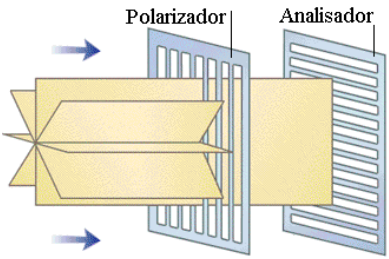

Figura 3.89: Polarizador e analisador girados 90° entre sí.

tação que ela podia ser polarizada, passou-se a considerar a luz, bem como todas as ondas eletromagnéticas, como sendo ondas transversais.

A luz polarizada tem características diferentes da não polarizada, mas os olhos humanos não conseguem distinguir uma da outra (para saber se a luz é polarizada ou não tem-se que usar um polarizador). Alguns animais conseguem fazer isso naturalmente, como as abelhas, as quais detectam a luz polarizada que vem do céu[33] e conseguem se localizar.

As ondas eletromagnéticas podem ser emitidas já polarizadas, como por exemplo as ondas de rádio e de televisão, que são produzidas por oscilações de cargas elétricas nas antenas e, geralmente, são linearmente polarizadas ao longo da direção paralela à antena.

[33] A direção de vibração da luz azul polarizada, por exemplo, varia com a mudança de posição do sol no céu.

3.75 Polaroides e Lei de Malus

Objetivo

Verificar a intensidade da luz que passa por 2 polaroides em função do ângulo entre as suas direções de polarizações.

Materiais Utilizados

2 polaroides, 1 fonte de luz, 1 luxímetro[34], 1 transferidor.

Montagem e Procedimento

Monta-se o experimento de acordo com o esquema da Fig.(3.90).

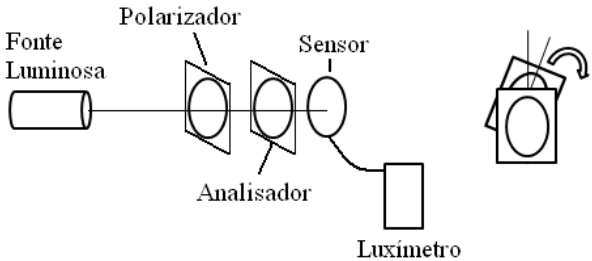

Figura 3.90: Fonte de luz, polaroides e luxímetro.

Inicialmente coloque o polarizador e o analisador com a mesma direção de polarização. Atrás do analisador acople o sensor do luxímetro. Mantenha o polarizador fixo e vá girando o analisador, acompanhando o ângulo de giro (θ) com o transferidor. Faça incidir luz de intensidade fixa sobre os polaroides e vá anotando os valores da intensidade luminosa que passa por eles, a qual é detectada pelo luxímetro, em função do ângulo θ.

[34] O luxímetro é o nome do equipamento que mede a intensidade luminosa, cuja principal unidade de medida é o *lux*.

Análise e Explicação

Um polaroide é constituído por uma lâmina flexível, contendo certos compostos poliméricos. A lâmina plástica é estirada de modo que as moléculas se alinham paralelamente entre si. Nessa condição serão transmitidas apenas as ondas cujos campos elétricos vibrem na direção paralela à direção de alinhamento das moléculas do polaroide.

Em uma onda eletromagnética normal o campo elétrico $\vec{E}$ vibra em todas as direções possíveis. Quando $\vec{E}$ vibra numa mesma direção em todos os instantes, diz-se que a onda está polarizada.

Imagine um feixe de luz polarizado, propagando-se na direção z, incidindo num polaroide disposto no plano xy (z é perpendicular ao plano xy). O vetor $\vec{E}$ incidente no polaroide faz um ângulo θ com o eixo y, como representado na Fig.(3.91), de modo que ele tem as seguintes componentes E_x e E_y:

$$E_x = Esen\theta \qquad\qquad E_y = Ecos\theta$$

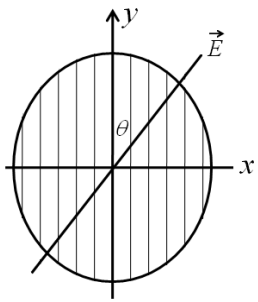

Figura 3.91: Vetor $\vec{E}$ fazendo um ângulo θ com o eixo y do polaroide.

Sendo que neste caso o polaroide está orientado na direção y, somente a componente E_y, que é paralela ao eixo do polaroide, será transmitida. Dessa forma tem-se que a luz transmitida pelo analisador tem campo elétrico cuja intensidade é dada por:

$$E = E_0 cos\theta \tag{3.29}$$

onde E_0 é o campo elétrico que passa pelo polarizador e incide no analisador.

De acordo com o eletromagnetismo tem-se que a intensidade de uma onda eletromagnética é:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{E^2}{c\mu} \tag{3.30}$$

onde P é a potência da radiação incidente numa área A, c é a velocidade da luz e μ é a constante de permeabilidade magnética do meio. A partir de (3.30) vem que:

$$I = \frac{1}{c\mu}E^2 \tag{3.31}$$

Sendo $1/c\mu$ uma constante, em (3.31) verifica-se que a intensidade da onda eletromagnética é proporcional ao quadrado do campo elétrico $\vec{E}$. Dessa forma, relacionando (3.31) com (3.29) e considerando I_0 a intensidade inicial da radiação, obtém-se:

$$I = I_0 cos^2\theta \tag{3.32}$$

a qual é conhecida como Lei de Malus. A lei de Malus foi descoberta experimentalmente em 1809 por Etienne Malus usando diferentes técnicas de polarização.

Na Tab.(3.4) há um conjunto de dados de $I \times \theta$ obtidos experimentalmente.

Tabela 3.4: $I \times \theta$.

$I(lux)$	$\theta(^\circ)$
280	10
255	20
217	30
182	40
130	50
90	60
55	70
33	80
06	90

Desenhando um gráfico de $I \times cos^2\theta$, pode-se constatar a lei de Malus $I = I_0 cos^2\theta$, já que o obtido é uma reta.

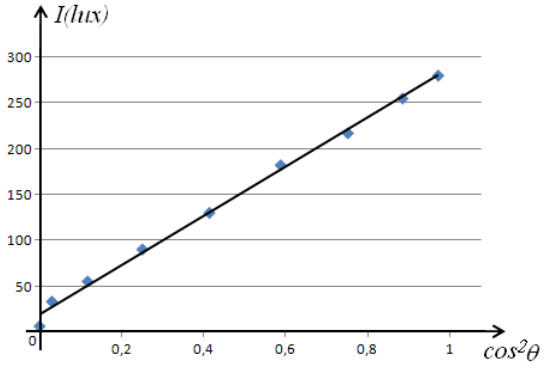

Figura 3.92: Gráfico de $I \times cos^2\theta$.

REFERÊNCIAS

1. ARAÚJO, Mauro S. T. de; ABIB, Maria L. dos S.. *Atividades Experimentais no Ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.27, n.2, p.176-194, julho de 2003.

2. AXT, Rolando; BONADIMAN, Helio; SILVEIRA, Fernando da. *O Uso de Espirais de Encadernação como Molas*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.27, n.4, p.593-597, 2005.

3. BERKES, Istvan. *A Física do Quotidiano*. Tradução de Florbela Fernandes. 1ª ed. Lisboa: Gradiva, 1992.

4. BISCUOLA, Gualter J.; BÔAS, Newton V.; DOCA, Ricardo H.. *Física*. v.2. 1ª ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

5. BORGES, A. Tarciso. *Novos Rumos para o Laboratório Escolar de Ciências*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v.19, n.3, p.291-313, dezembro de 2002.

6. CAMPOS, Agostinho A. G.; ALVES, Elmo S.; SPEZIALI, Nivaldo L.. *Física Experimental Básica na Universidade*. 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008.

7. CARDOSO, Henrique B; MENDES FILHO, Josué. *Improvisando dentro da Sala de Aula*. Física na Escola. v.3, n.2, p.05-06, 2002.

8. CARRON, Wilson; GUIMARÃES, Osvaldo. *Física*. v.único. 2ª ed. São Paulo: Moderna, 2003.

9. CAVALCANTE, Marisa; TAVORALO, Cristiane. *Medir a Velocidade do Som pode ser Rápido e Fácil*. Física na Escola. v.4, n.1, p.2-30, 2003.

10. CAVALCANTE, Marisa; PEÇANHA, Renata; LEITE, Vinicius F.. *Principios Básico de Imagens Ultra-Sônicas e a Determinação da Velocidade do Som no Ar Através do Eco*. Física na Escola. v.12, n.2, 2011.

11. CENCI, Rejane; SANTOS, Muriel C. dos; CIVIDINI, Cleison C.; PERUZZO, Jucimar. *Capacidade Térmica e Calor Específico*. Disciplina de Física Experimental II. Curso de Licenciatura em Física. Centro Universitário Diocesano do Sudoeste do Paraná, Palmas, PR, 2005.

12. CENCI, Rejane; SANTOS, Muriel C. dos; PERUZZO, Jucimar; CIVIDINI, Cleison C.. *Luz Plano Polarizada*. Disciplina de Física Experimental IV. Curso de Licenciatura em Física. Centro Universitário Diocesano do Sudoeste do Paraná, Palmas, PR, 2006.

13. CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. *Termodinámica*. 6ª ed. México, D. F.: McGraw-Hill, 2009.

14. CERQUEIRA, Francklin E. M.. *Ensino Interativo de Física: atividades experimentais para ensinar física*. 2004. Vert site

15. CORRADI, W.; VIEIRA, S. L. A.; TÁRSIA, R. D.; BALZUWEIT, K.; FONSECA, L.;OLIVEIRA, W. S. de. *Física Experimental*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008.

16. COUTO, Francisco P.. *Atividades Experimentais em Aulas de Física: repercussões na motivação dos estudantes, na dialogia e nos processos de modelagem*. Dissertação (Mestrado em Educação). Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2009.

17. CRUZ, Roque; LEITE, Sergio; CARVALHO, Cassiano de. *Experimento de Física em Microescala*. v.2. São Paulo: Scipione, 1997.

18. DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José A.; PERNAMBUCO, Marta M.. *Ensino de Ciências: fundamentos e métodos*. 3ª ed. São Paulo: Cortez, 2009.

19. FAVA, Luiz F.. *Por que o Céu é Azul*. Caderno Catarinense de Ensino de Física. 2(1); p. 3-5, abril de 1985.

20. FIGUEROA, D.; GUTIERREZ, G. *Demostraciones de Física: elemento motivador en la formación del Docente*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.14, n.4, p.253-256, 1992.

21. GASPAR, Alberto. *Física*. v. único. 1ª ed. São Paulo: Ática, 2008.

22. GASPAR, Alberto. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. 1ª ed. São Paulo: Ática, 2009.

23. GASPAR, Alberto. *Compreendendo a Física*. v.2. São Paulo: Ática, 2010.

24. GIORDAN, M. *O Papel da Experimentação no Ensino de Ciências*. Química Nova na Escola. n°10, Novembro de 1999.

25. GOMES, Cezar A.; LUDKE, Everton. *Uso da Ressonância em Cordas para Ensino de Física*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.33, n.3, 2011.

26. GONÇALVES FILHO, Aurélio; TOSCANO, Carlos. *Física e Realidade*. v.2. 1ª ed. São Paulo: Scipione, 2011.

27. GREF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Leituras de Física*. v.2. São Paulo: Edusp, 1998.

28. GUIMARÃES, Luciana R.. *Atividades para Aulas de Ciências: ensino fundamental, 6º ao 9º ano*. 1ª ed. São Paulo: Nova Espiral, 2009.

29. HOROWICZ, Ricardo J.. *Luz, Cores ... Ação: ótica e suas aplicações tecnológicas*. 1ª ed. São Paulo: Moderna, 1995.

30. JURAITIS, Klememsas R.; DOMICIANO, João B.. *Introdução ao Laboratório de Física Experimental: métodos de obtenção, registro e análise de dados experimentais*. Londrina: EDUEL, 2009.

31. LABURÚ, Carlos E.; TREVISAN, Fabrícia. *Fumaça Sobe ou Desce?* Física na Escola. v.4, n.2, 2003.

32. LABURÚ, Carlos E.. *Seleção de Experimentos de Física no Ensino Médio: uma investigação a partir da fala de professores*. Investigação em Ensino de Ciências. v.10(2), p. 161-178, 2005.

33. LOPES, Élder; LABURÚ, Carlos. *Diâmetro de um Fio de Cabelo por Difração: um experimento simples*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v.18, n.2, p.240-247, agosto de 2001.

34. *MANUAL de Atividades Práticas. Física e Ciências*. 4ª ed. Autolabor Soluções Inteligentes, 2006.

35. MATTOS, Cristiano; GASPAR, Alberto. *Uma Medida de Calor Específico sem Calorímetro*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.25, n.1, p.45-48, março de 2003.

36. MÁXIMO, Antônio; ALVARENGA, Beatriz. *Física - Ensino Médio*. v.2. São Paulo: Scipione, 2008.

37. MÁXIMO, Antônio; ALVARENGA, Beatriz. *Curso de Física*. v.2. São Paulo: Scipione, 2010.

38. MENDES, Paulo. Física Experimental: *Como Realizar Experiências em Física*. Coimbra: Universidade de Coimbra, 1998.

39. MICHA, Daniel N.; PENELLO, Germano M.; KAWABATA, Rudy M. S.; CAMAROTTI, Teo. *Vendo o Invisível. Experimentos de Visualização do Infravermelho Feitos com Materiais Simples e de Baixo Custo*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.33, n.1, 2011.

40. MICHA, Daniel N.; PENELLO, Germano M.; KAWABATA, Rudy M. S.; CAMAROTTI, Kawabata; TORELLY, Guilherme; SOUZA, Patrí-

cia de. *Enxergando no Escuro: a Física do Invisível*. Física na Escola. v.12, n.2, 2011.

41. MOURA, Daniel de A.; BERNARDES NETO, Pedro. *O Ensino de Acústica no Ensino Médio por Meio de Instrumentos Musicais de Baixo Custo*. Física na Escola. v.12, n.1, 2011.

42. OLIVEIRA, G. S. de; SILVA, N. F. da; HENRIQUES, R. (Org). Mudanças Climáticas: Ensinos Fundamental e Médio. Coleção Explorando o Ensino, v. 13. Brasília: MEC, SEB; MCT; AEB, 2009.

43. *PARÂMETROS Curriculares Nacionais (PCNs)*. Ensino Médio. Brasília: Ministério da Educação, 1999.

44. PENTEADO, Paulo C. M.; TORRES, Carlos M. A.. *Física - Ciência e Tecnologia*. v.2. São Paulo: Moderna, 2005.

45. PERUZZO, Francisco; CANTO, Eduardo do. *Química na Abordagem do Cotidiano*. v.2. 4ª ed. São Paulo: Moderna, 2010.

46. PERUZZO, Jucimar; CIVIDINI, Cleison C.. *Espelhos e Lentes*. Disciplina de Física Experimental IV. Curso de Licenciatura em Física. Centro Universitário Diocesano do Sudoeste do Paraná, Palmas, PR, 2006.

47. PIACENTINI, João J.. *Introdução ao Laboratório de Física*. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 1998.

48. RAMALHO JR., Francisco; FERRARO, Nicolau G.; SOARES, Paulo A. de T.. *Os Fundamentos da Física*. v.2. São Paulo: Moderna, 2003.

49. RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; KRANE, Kenneth. *Física*. v.2 e 4. Tradução de P. M. C. L. Pacheco, L. de S. Xavier, P. P Kenedi e M. A. Savi. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

50. ROCHA, M. N.; FUJIMOTO, T. G.; AZEVEDO, R. S.; MURAMATSU, M.. *O Azul do Céu e o Vermelho do Pôr-do-sol*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.32, n.3, 2010.

51. SABA, Marcelo; RAPOZO, Rodrigo; SANTANA, Gustavo. *Fotografando o que não se Vê*. Física na Escola. v.3, n.1, p.12-14, 2002.

52. SALINAS, Julia; SANDOVAL, José. *Enseñanza Experimental de la Óptica Geométrica: campos de visión de lentes e espejos*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.22, n.2, junho de 2000.

53. SAMPAIO, José L.; CALÇADA, Caio S.. *Universo da Física*. v.2. 2ªed. São Paulo: Atual, 2005.

54. SANT'ANNA, Blaidi; MARTINI, Gloria; REIS, Hugo C.; SPINELLI, Walter. *Conexões com a Física*. v.2. 1ª ed. São Paulo: Moderna, 2010.

55. SANTOS, Muriel C. dos; CENCI, Rejane; CIVIDINI, Cleison C.; PERUZZO, Jucimar. *Ondas Estacionárias em Cordas e em Tubos*. Disciplina de Física Experimental II. Curso de Licenciatura em Física. Centro Universitário Diocesano do Sudoeste do Paraná, Palmas, PR, 2005.

56. SERWAY, Raymond. *Física Para Cientistas e Engenheiros*. v.2 e 4. 3ªed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

57. SILVA, Osmar H. M. da; LABURÚ, Carlos E.. *Invisibilidade da Garrafa (A Explicação Correta)*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v.21, n.1, p.111-114, 2004.

58. SILVA, Claudio X. da; BARRETO FILHO, Benigno. *Física: Aula por Aula*. v.2. São Paulo: FTD, 2010.

59. SILVA, Wilton,. et al. *Velocidade do Som no Ar: um experimento caseiro com microcomputador e balde d'água*. Revista Brasileira de Ensino de Física. v.25, n.1, 2003.

60. SILVA, Flávia M. da; MURAMATSU, Mikiya. *Medindo Refração de Líquidos usando Difração da Luz*. Física na Escola. v.8, n.1, p.46-47, 2007.

61. SILVEIRA, Fernando L. da; LEVIN, Yan. *Pressão e Volume em Balões de Festas: podemos confiar em nossa intuição*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v.21, n.3, Dezembro de 2004.

62. SILVEIRA, Fernando L. da; AXT, Rolando; PIRES, Marcelo. *O que Vemos quando nos Miramos em um Espelho Côncavo?*. Brasileiro de Ensino de Física. v.26, n.1, p.19-25, Dezembro de 2004.

63. SILVEIRA, Fernando L. da; MEDEIROS, Alexandre. *A Ilusão sobre o Tamanho da Lua no Horizonte*. Física na Escola. v.7, n.2, p.67-69, 2006.

64. SILVEIRA, Fernando L. da. *A "Atração"entre as Sombras*. Física na Escola. v.8, n.1, p.17-21, 2007.

65. STUCHI, Adriano. *Sugestão de Experimento para a Verificação da Troca de Calor por Convecção*. Física na Escola. v.4, n.1, p.15-16, 2003.

66. SOUZA, James A.; OLIVEIRA, Cleidson S. de. *Uma Luz na Aprendizagem de Ciência: inserindo a prática investigativa com uma vela*. Física na Escola. v.11, n.2, 2010.

67. TORRES, Carlos M. A.; FERRARO, Nicolau G.; SOARES, Paulo A. de T.. *Física: Ciência e Tecnologia*. v.2. 1ª ed. São Paulo: Moderna, 2010.

68. UENO, Paulo. *Física*. v.único. 1ª ed. São Paulo: Ática, 2005.

69. VALADARES, Eduardo de C.. *Física Mais que Divertida: inventos eletrizantes baseados em materiais reciclados e de baixo custo*. 3ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.

70. WALKER, Jearl. *O Grande Circo da Física*. Tradução de Jorge A. Valadares. 2ª ed. Lisboa: Gradiva, 2001.

71. YAMAMOTO, Kazuhito; FUKE, Luiz F.. *Física para o Ensino Médio*. v.2. 1ª ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

72. *Baú de Ciências*. `www.fsc.ufsc.br/baudeciencias`. Acesso entre 01/03/2012 e 10/03/2012.

73. *Ciência à Mão - Portal de Ensino de Ciências*. www.cienciamao.usp.br. Acesso entre 01/06/2011 e 15/06/2011.

74. *Experimentoteca-Ludoteca*. www.ludoteca.if.usp.br. Acesso entre 10/11/2010 e 15/12/2010.

75. *Experimentos de Física*. www.fc.unesp.br/experimentosdefisica/ Acesso entre 10/11/2010 e 15/12/2010.

76. *Feira de Ciências*. www.feiradeciencias.com.br. Acesso entre 10/11/2010 e 15/12/2010.

77. *Mago da Física*. www.magodafisica.com. Acesso entre 01/06/2011 e 15/06/2011.

78. *Sala de Física*. www.saladefisica.cjb.net. Acesso entre 10/11/2010 e 15/12/2010.

79. *Seara da Ciência*. www.seara.ufc.br. Acesso entre 10/11/2010 e 15/12/2010.

Índice Remissivo

água em ebulição, 73
água sob pressão, 119, 121
índice de refração, 265, 272, 322
ângulo de incidência, 231
ângulo de reflexão, 231
ângulo de visão, 305
ângulo limite, 278

aceleração da gravidade, 154
acendendo uma vela, 129
aeolípile, 132
aerossol, 111
agitação dos átomos, 60
albedo, 354
alteração da frequência, 198
amplificação de uma deformação, 245
amplificação de uma onda, 215
anéis de interferência, 314
anéis ressonantes, 166
anel de Gravezande, 52
ar aquecido, 84
arco-íris, 348
associação de espelhos, 235, 239
astigmatismo, 302
atração entre sombras, 225
atrito e calor, 124

balões, 90
balões acoplados, 23
barco a vapor, 135
batimento, 209
bolhas na água, 73

câmara escura, 227
caixas de ressonância, 206
calefação, 115, 116
caleidoscópio, 237
calor e temperatura, 78
calor específico, 96, 98
calor latente, 106
calor, massa e temperatura, 92
calorímetro, 94
calota esférica, 247
canhão de latas, 130
capacidade térmica, 94, 107
chafariz térmico, 11
chama de uma vela, 86
chama e água, 9
chama que não queima, 234
chama que se apaga, 75
chamas em rotação, 86
cofre de Gravezande, 50
composição da luz, 338
compressão adiabática, 140

comprimento de onda, 310, 339
condensação do vapor de água, 105
condições de nitidez de Gauss, 247
condução, 59
condutividade térmica, 79, 81
congelamento da água, 104
convecção, 62
convecção de líquidos, 67
convecção do ar, 84
copo e balão, 26
cores, 350
cores do céu, 335
correntes de convecção, 63, 65
cortando o gelo, 126
curvando um feixe de luz, 268, 269

decomposição da luz, 338, 340
defeitos de visão, 301
deformação de uma garrafa, 6
deformação de uma lata, 7
densidade de gases, 17
derretendo gelo, 108
desvio lateral da luz, 270
determinação de alturas, 226
diâmetro de um fio de cabelo, 320
diapasão, 206, 208, 209, 211
difração, 204, 318
difração da luz, 309, 312, 313
difusão da luz, 221
dilatômetro, 48
dilatação de líquidos, 54
dilatação em dupla face, 46
dilatação linear, 44
dilatação superficial, 50
dilatação volumétrica, 52
dioptria, 290
disco branco e preto, 345
disco de Newton, 341
distância focal, 255, 288, 297
distribuição de Boltzmann, 109

ebulidor de Franklin, 19
efeito albedo, 353, 355, 356
efeito Doppler, 198
efeito Tyndall, 126
enchendo um balão, 27
entropia, 142
equilíbrio térmico, 76
espalhamento da luz, 335
espectro de cores, 326
espectro eletromagnético, 339
espelho côncavo, 247, 250, 259
espelho convexo, 247, 253
espelhos esféricos, 247, 255
espelhos planos, 232, 235, 240, 241
estados físicos da matéria, 102
estalo supersônico, 202
estudo das cores, 350
evaporação de um líquido, 109
expansão adiabática, 138
expansão de um gás, 4

feixe de luz, 265
fervendo água, 119, 121
fibra óptica, 280
figura de interferência, 320
fio de cabelo, 320
fluxo de calor, 81
formação de brisas, 100
formação de nuvem, 13

fotografia, 307
franjas de luz, 310
frequência de oscilação, 147
frequência de rotação, 151
frequência de um diapasão, 211
frequência de vibração, 186
frequência natural, 164
frequência ressonante, 164
fumaça que desce, 42
funcionamento dos pulmões, 29

Galileu, 1
garrafa PET, 6
gelo, 104
gelo e sal, 108
gelo embrulhado, 83

harmônicos, 189, 192
hipermetropia, 302

ilusão de óptica, 328, 333
imagem invertida, 228
imagens no espelho plano, 232
independência dos raios de luz, 222
interferência, 209, 318
interferência da luz, 309, 312–314, 327
interferência no diapasão, 208
invisibilidade, 284
irradiação, 88

lâmpada fluorescente, 20
lei de Boyle-Mariotte, 33
lei de Charles, 38
lei de Charles e Gay-Lussac, 30
Lei de Hook, 147
lei de Malus, 360
lei de Snell-Descartes, 265
leis da reflexão, 231, 247
leite e água, 128
lente cilíndrica, 303
lente convergente, 287, 289, 293, 302
lente divergente, 287, 289, 291, 301
lentes bifocais, 302
lentes cilíndricas, 302
lentes esféricas, 287, 291, 293
levitação virtual, 330
lupa, 299
luz branca, 339
luz coerente, 318
luz do sol, 353
luz laser, 318, 321
luz monocromática, 318
luz no prisma, 338
luz polarizada, 357

máquina a vapor, 133
mancha de Poisson, 315
meio opaco, 219
meio translúcido, 219
meio transparente, 219
miopia, 301
movimento de um chicote, 202
movimento harmônico simples, 145
movimento oscilatório, 146, 148
movimento periódico, 148
mudanças de estados físicos, 102
multiplicação de imagens, 235

naftalina, 113
nuvem, 13

olhos vermelhos, 307

onda de choque, 202
onda eletromagnética, 357, 361
onda longitudinal, 358
ondas estacionárias, 183, 211
ondas estacionárias em cordas, 178
ondas estacionárias em tubos, 188, 191
ondas estacionárias numa mola, 182
ondas longitudinais, 158
ondas sonoras, 160, 175
ondas transversais, 158, 358
orifício e difração, 308
oscilação do pêndulo, 147, 163
oscilador harmônico, 145

pêndulo cônico, 151
pêndulo de Foucault, 156
pêndulo de Pulfrich, 333
pêndulo simples, 148, 154
pêndulos acoplados, 162
pêndulos ressonantes, 164
panela de pressão, 123
papel que não queima, 82
paraboloide, 215
paradoxo no banho-Maria, 71
películas de sabão, 326
penumbra, 223, 225
período, 147
período de oscilação, 163
periscópio, 243
pião de cores, 343
polarização da luz, 357
polarizadores, 357
polaroide, 357, 360
ponto de ebulição, 102, 118
ponto de fusão, 102
ponto de orvalho, 105
presbiopia, 302
pressão atmosférica, 6, 7, 118
pressão e ponto de ebulição, 118
pressão e volume, 26, 33
pressão interna de uma lâmpada, 20
primeira lei da termodinâmica, 139
projeção de imagens, 259
projeção de imagens por lentes, 295
propagação da luz, 226
propagação de calor, 59, 62, 88
propagação não-retilínea da luz, 267
propagação retilínea da luz, 227

quantidade de calor, 92

raios de luz, 247, 287
ranhuras no cd, 317
rasgando um tecido, 187
rede de difração, 323, 340
reflexão da luz, 230
reflexão num espelho, 282
reflexão total da luz, 274, 276, 348
refração da luz, 261, 264, 266
refração num espelho, 282
ressonância, 162, 188, 209
ressonância de um pêndulo, 168, 170
ressonância de uma taça, 173
ressonância forçada, 168, 170

segunda lei da termodinâmica, 141
semelhança de triângulos, 226
sensação térmica, 78
sistema refletor inversor, 241
solidificação da água, 104

som de um fio, 185
sombra, 223
sombras coloridas, 352
sublimação, 113
sucção da água, 9
superposição de ondas, 208

túnel do tempo, 239
telefone de cordel, 175
temperatura, 353
termômetro, 353
termômetro de Galileu, 1
termômetro na água quente, 58
timbre, 214
tipos de óculos, 301
tira de borracha, 137
trajetória da luz, 221
trajetória retilínea da luz, 221
transferência de calor, 76, 90
transformação adiabática, 139
transformação isotérmica, 33, 36
transformação isovolumétrica, 38, 41
transmissão da luz, 219
trilhas do cd, 318
tubos sonoros, 188, 191, 194

vaporização forçada, 115
vela, 9
vela em queda livre, 69
velocidade angular, 147
velocidade da luz, 264
velocidade de ondas em cordas, 183
velocidade do som, 196
ventilação e resfriamento, 74
vergência, 289
vibração de uma taça, 172
vibração do diapasão, 207
visão tridimensional, 332
volume e temperatura, 15, 30