

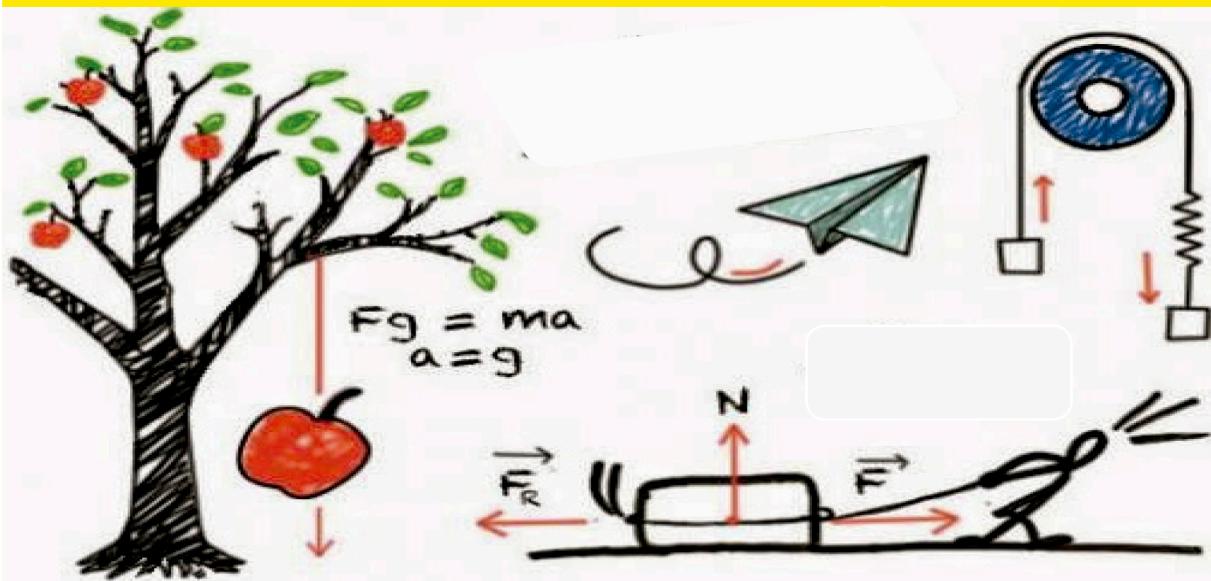


Cadernos dos Cursinhos Pré-Universitários da UNESP

ANTONIO FRANCISCO MARQUES
MARIA DA GRAÇA MELLO MAGNONI
EDITORES

CIÊNCIAS DA NATUREZA FÍSICA

MARCO AURÉLIO ALVARENGA MONTEIRO
ORGANIZADOR



VOLUME 4

CADERNOS DOS CURSINHOS PRÉ- UNIVERSITÁRIOS DA UNESP

ANTONIO FRANCISCO MARQUES
MARIA DA GRAÇA MELLO MAGNONI
EDITORES

CIÊNCIAS DA NATUREZA FÍSICA

MARCO AURÉLIO ALVARENGA MONTEIRO
ORGANIZADOR

VOLUME 4

SÃO PAULO
2016

Realização
Pró-Reitoria de Extensão – PROEX
Rua Quirino de Andrade, 215 – 10º andar
São Paulo, CEP 01049-010 – SP
Tel (11) 5627-0264

Reitor
Julio Cezar Durigan

Vice-reitor
Eduardo Kokubun

Pró-reitora de Extensão Universitária
Mariângela Spotti Lopes Fujita

Pró-reitora de Pesquisa
Maria José Soares Mendes Giannini

Pró-reitor de Graduação
Laurence Duarte Colvara

Pró-reitora de Pós-Graduação
Lourdes Aparecida Martins dos Santos-Pinto

Pró-reitor de Administração
Carlos Antonio Gamero

Secretaria Geral
Maria Dalva Silva Pagotto

Produção planejada pelo Projeto "Inovação nos processos de gestão e pedagógico dos Cursos Pré-Vestibulares da Unesp"

Diagramação e capa
Edevaldo Donizeti dos Santos

Impressão e acabamento: Gráfica FCL/Araraquara

Revisão
Élide Ferres
Maria Luzinete Euclides
Rony Farto Pereira

Conselho Editorial da PROEX - Unesp
Profa. Dra. Maria Candida Soares Del Masso (FFC / Marília)
Prof. Dr. Claudio César de Paiva (FCL / Araraquara)
Profa. Dra. Márcia Pereira da Silva (FCHS / Franca)
Profa. Dra. Rosane Michelli de Castro (FFC / Marília)
Sra. Angela de Jesus Amaral (PROEX / Reitoria)
Sr. Oscar Kazuyuki Kogiso (ICT / São José dos Campos)

Coordenação geral
Profa. Dra. Mariângela Spotti Lopes Fujita

Editores
Prof. Dr. Antonio Francisco Marques
Profa. Dra. Maria da Graça Mello Magnoni

Organização
Marco Aurélio Alvarenga Monteiro

C569 Ciências da natureza : física / Marco Aurélio Alvarenga Monteiro, organizador. – 2. ed. – São Paulo : Cultura Acadêmica, 2016.
274 p. : il. - (Cadernos dos cursinhos pré- universitários da Unesp ; 4)
ISBN 978-85-7983-823-1

1. Física (Ensino médio) – Estudo e ensino. 2. Mecânica. 3. Termodinâmica. 4. Eletromagnetismo. 5. Ótica. 6. Universidades e faculdades - Vestibular. I. Monteiro, Marco Aurélio Alvarenga. II. Série.

CDD 530.07

PREFÁCIO

A ideia de construção dos conteúdos disciplinares dos 6 cadernos que compõem a 2º Edição do conjunto do material didático a ser utilizado pelos Cursinhos Pré-Universitários¹ surgiu desde o início da gestão, em 2013, durante proveitosas discussões em reuniões com os professores e estudantes na condição, respectivamente, de coordenadores e tutores. Havia, naquela ocasião, uma grande preocupação com relação à disponibilidade do material didático de um ano vigente para um próximo ano, considerando-se a provisão orçamentária. Além disso, havia um desejo dos envolvidos por conteúdos que mais se aproximasse do contexto social e educacional dos cursistas provenientes da escola pública e de famílias de baixa renda, para promover, de modo mais abrangente, a inclusão em um contexto de aquisição e de construção de conhecimentos necessários ao ingresso em cursos de graduação ou no mercado de trabalho, mediante participação em concursos.

O grande desafio da existência dos Cursinhos Pré-Universitários da UNESP sempre foi a oferta do material didático com os conteúdos disciplinares necessários, de um lado, para facilitar o processo comunicativo entre professor e cursista na sala de aula e, de outro, para orientar a aprendizagem do cursista fora da sala de aula. Portanto, o material didático é o instrumento que orienta o processo de aquisição e construção do conhecimento dos cursistas dos Cursinhos Pré-Universitários, em um curto período de tempo, com finalidade definida de ingresso em concursos e, ainda, a fim de propiciar sua inclusão. Nesse sentido, discutiu-se a viabilidade de a UNESP construir material didático próprio, dadas as características únicas de distribuição regional multicampus e da evolução histórica de seus Cursinhos Pré-Universitários, atualmente Subprograma de extensão “Cursinhos Pré-Universitários da UNESP”, do programa de extensão “Divulgação, Orientação e Informação Profissional”.

Antes de sua concretização, essa discussão levou em consideração resultados de outras iniciativas da Pró-Reitoria de Extensão - PROEX - na tentativa de realizar parcerias com editoras comerciais e de organizações não governamentais, dedicadas a

¹ Atualmente, existem 27 Cursinhos Pré-Universitários UNESP e 4 Cursinhos em convênios com Prefeituras, em funcionamento, localizados em 23 cidades do interior paulista, junto a Unidades Universitárias da UNESP. O modelo implantado atende a alunos regulares e egressos da rede pública de ensino e oferece aulas ministradas por graduandos dos diversos cursos da UNESP – bolsistas e voluntários –, que visam a suprir lacunas de formação de alunos regulares do 3º ano e egressos do ensino médio, com vistas a oferecer reforço de ensino e preparo para o ingresso e permanência na universidade. Para isso, a UNESP, por meio da Pró-Reitoria de Extensão Universitária, mantém um Programa Institucional com bolsas de extensão universitária para alunos de seus cursos de graduação atuarem como tutores de ensino.

cursinhos populares e comunitários, que, após negociações, revelaram impossibilidade de execução.

A proposta de construção do material didático, após debates, foi acolhida por Grupo de Pesquisa da Faculdade de Ciências do Câmpus de Bauru, com inserção e experiência na coordenação de Cursinho Pré-Universitário, o qual elaborou o “Projeto de produção, manutenção e atualização de material didático-pedagógico”.

O Projeto, coordenado pela Pró-Reitoria de Extensão Universitária e elaborado pelos Professores Doutores Antonio Francisco Marques e Maria da Graça Mello Magnoni, da Faculdade de Ciências do Campus de Bauru, foi concebido com o objetivo de organizar, adequar e disponibilizar cadernos com os conteúdos curriculares das diversas áreas do conhecimento para as atividades pedagógicas nos cursinhos pré-universitários da UNESP, nas seguintes áreas do conhecimento: “Linguagens e Códigos”, “Matemática”, “Biologia”, “Química”, “Física”, “Ciências Humanas” e o “Caderno de Material Complementar e de Apoio”.

No ano de 2015, foram construídos os conteúdos das áreas de conhecimento que resultaram na publicação da 1º Edição com seus 5 cadernos: Linguagens e Códigos, Matemática, Ciências da Natureza, Ciências Humanas e Material de Apoio.

A 2º Edição contemplou a atualização, reformulação e inclusão dos conteúdos para publicação dos cadernos, em 2016. Nesta nova edição, o Caderno 3 - Ciências da Natureza que reunia as áreas de Biologia, Química e Física, foi segmentado em três cadernos e cada uma destas áreas se constituiu em um caderno independente.

Não restam dúvidas de que a publicação destes Cadernos representa um passo dado de grande relevância para o aprimoramento dos Cursinhos Pré-Universitários, mas também, de alta responsabilidade social, porquanto deverá influenciar a inclusão, conforme preconiza a Política Nacional de Extensão e a Política de Extensão da UNESP.

Dessa forma, os cadernos serão o instrumento principal da política pedagógica do Subprograma de Extensão “Cursinhos Pré-Universitários da UNESP”, com a proposta de unificar a orientação pedagógica dos 27 Cursinhos Pré-Universitários e, ao mesmo tempo, dar visibilidade a essa importante ação de extensão universitária de grande espectro e impacto social, no interior do Estado de São Paulo que, smj, é única no Brasil entre as IES.

Pela atuação dos Professores editores Antonio Francisco Marques e Maria da Graça M. Magnoni, dos autores e dos colaboradores, agradecemos o empenho, esforço e dedicação, ao assumirem a responsabilidade de criação e atualização constante dos conteúdos dos Cadernos que, decisivamente, eleva o patamar de qualidade no atendimento das demandas pelos Cursinhos.

Faz-se mister destacar o apoio incondicional da Reitoria da UNESP, nas pessoas do Prof. Dr. Julio Cezar Durigan, Reitor, e Prof. Dr. Eduardo Kokubun, Vice-Reitor, na idealização e fortalecimento dos Cursinhos Pré-Universitários, o que facilitou a condução de todos os trabalhos de organização da publicação.

Finalmente, é preciso salientar a valiosa atuação dos Cursinhos Pré-Universitários na extensão universitária da UNESP, com resultados de impacto na transformação da realidade social da comunidade externa à Universidade.

Mariângela Spotti Lopes Fujita
Pró-Reitora de Extensão Universitária da Unesp

APRESENTAÇÃO

Apresentamos a 2^a edição da coletânea de cadernos dos Cursinhos Pré-Vestibulares da Unesp.

Considerando a realidade concreta do Ensino Médio e os desafios que ele representa aos poderes públicos, os cursinhos pré-vestibulares apresentam uma ação em prol da democratização do ensino superior brasileiro, na tentativa de minimizar uma realidade histórica e socialmente perversa, que exclui milhões de brasileiros das classes desfavorecidas da participação e ou da aprovação nos concursos vestibulares para ingresso nas universidades públicas. Orientados pela lógica do direito à educação, os cursinhos pré-universitários constituem, então, situações emergenciais enquanto o Estado e a sociedade brasileira não garantirem uma educação básica de qualidade para todos.

Tendo em vista que os Cursos Pré-Universitários da UNESP visam atender às demandas educacionais dos egressos e concluintes do último ano do ensino médio público, os editores e coordenadores dos cadernos optaram pelos conteúdos propostos para a avaliação do ENEM.

Esta edição é uma revisão da edição anterior com ampliação dos conteúdos nas áreas de conhecimento de Linguagem, Matemática, Ciências Naturais, ficando este último subdividido em três cadernos.

Ao permitir à Universidade atender parte dos seus objetivos, o Projeto proporciona ganhos aos seus docentes e discentes. Os alunos dos diferentes cursos ou licenciaturas, na situação de bolsistas e voluntários, têm a possibilidade de ampliar seus conhecimentos ao organizar didaticamente todo o processo de ensino destinado aos cursistas, envolvendo principalmente os conteúdos e as metodologias em função dos diferentes grupos atendidos. Os demais graduandos, não envolvidos diretamente com o Cursinho, são beneficiados mediante a socialização das experiências pelos colegas bolsistas do Projeto, quando em sala de aula, ampliando as relações e vínculos com as atividades práticas na Educação Básica, etapa do ensino para a qual muitos estão em processo de formação.

A situação de aprendizagem para os discentes direta e indiretamente envolvidos ultrapassa, então, os limites dos saberes e práticas curriculares dos conhecimentos específicos, envolvendo experiências relativas às relações que se estabelecem entre todos os envolvidos no processo educativo e que não se restringem aos aspectos cognitivos, mas também afetivos e sociais.

Os investimentos em recursos humanos e financeiros destinados à pesquisa e produção dos recursos materiais voltados à extensão dos resultados à sociedade, através da divulgação do conhecimento científico, tecnológico, mas que concretizar os nossos objetivos de proporcionar o acesso da comunidade à Universidade, nos permite vivenciar a Universidade como perspectiva, como possibilidade para a realização de um trabalho que proporciona o envolvimento pessoal e coletivo, um esforço conjunto de muitas pessoas que assumiram o compromisso da realização, o compromisso com a Universidade Pública e que se auxiliam nas dificuldades, nos contratemos, nas propostas, na coragem para enfrentar as críticas e solucioná-las.

Como já colocado na edição anterior, o trabalho executado tem seus limites, porém é possível aperfeiçoá-lo nas próximas edições, com base nas experiências e avaliações dos usuários estudantes e dos monitores das salas de cursinhos espalhados nas dezenas de unidades universitárias da UNESP.

O material estará disponível para os alunos matriculados nos Cursinhos da UNESP na forma impressa e online, oportunizando aos estudantes externos e demais interessados o acesso livre e gratuito.

Antonio Francisco Marques
Maria da Graça Mello Magnoni

SUMÁRIO

FÍSICA

1 O que é a Física?	15
1.1 Introdução	15
2 Medidas Físicas?	19
2.1 Mas o que são grandezas físicas?	20
2.2 O significa medir grandezas físicas?	20
2.3 Sistema Internacional de Unidades	20
2.4 Precisão de uma medida	22
2.5 Incerteza na medição	22
2.6 Algarismos significativos	23
2.7 Representação de um número a partir de uma notação científica	24
2.8 O uso de prefixos na representação de medidas.....	25
3 grandezas vetoriais	26
3.1 Definição de vetor	27
3.2 Vetor resultante	27
3.2.1 O Método do Polígono	28
3.2.2 O Método do Paralelogramo	29
3.2.3 O Método da decomposição no sistema cartesiano	32
4 intrução ao estudo do movimento da cinemática.....	33
4.1 Sistemas de Referências	34
4.2 Ponto material e corpo extenso	35
4.3 Trajetória	37
4.4 Sentido do movimento	37
4.5 Posição de um ponto material ao durante o movimento	38
4.6 Deslocamento e Distância percorrida	39
4.7 Velocidade Média e Velocidade Instantânea	40
4.7.1 A Unidade de Velocidade.....	41
4.8 Aceleração Média e Aceleração Instantânea.....	42
4.8.1 A Unidade de aceleração.....	43
5 movimentos retilíneos	43
5.1 Movimento Retilíneo Uniforme (MRU).....	43
5.2 Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV)	46
5.2.1 Movimento Retilíneo Uniformemente Acelerado e Movimento Retilíneo Uniformemente Retardado	46
5.2.2 Função horária da Posição do MRUV	47
5.2.3 Equação do Torricelli.....	49

6 Queda livre	50
6.1 Ponto material abandonado de uma altura h sobre a superfície da Terra	51
6.2 Lançamento vertical para baixo	51
6.3 Lançamento vertical para cima	52
 7 lançamentos horizontais e oblíquos sem resistência do ar.....	54
7.1 Lançamentos horizontais	54
7.2 Lançamentos oblíquos.....	57
 8 Movimentos circulares.....	60
8.1 Movimento Circular Uniforme (MCU).....	60
8.1.1 A aceleração no MCU	61
8.1.2 Frequência e Período no Movimento Circular	63
8.1.3 Velocidade linear e Velocidade angular.....	64
8.1.4 Função horária do Movimento Circular Uniforme (MCU)	66
8.2 Movimento Circular Uniformemente Variado (MCUV)	66
8.2.1 Funções horárias do MCVU.....	67
8.2.2 Equação de Torricelli para o MCVU	68
 9 Dinâmica	68
9.1 Primeira Lei de Newton ou Lei da Inércia	68
9.2 Segunda Lei de Newton ou Lei de Causa e Efeito.....	69
9.2.1 Unidade de força	74
9.3 Terceira Lei de Newton ou Lei de Ação e Reação	75
9.3.1 Força Normal	76
9.3.2 Força de Reação ao peso	76
9.4 Forças em um corpo sob um plano inclinado	76
9.5 Força de atrito	78
9.5.1 Leis do atrito	80
9.6 Trabalho de uma força	82
9.6.1 Trabalho de uma força constante	83
9.6.2 Trabalho de uma força variável	84
9.6.3 Unidades de Trabalho de uma força.....	86
9.7 Potência	86
9.7.1 Unidades de potência	87
9.8 Energia Mecânica e sua conservação	87
9.8.1 Relação Energia Cinética e trabalho de uma força.....	89
9.8.2 Unidades de Energia.....	91
9.9 Impulso e Quantidade de Movimento	92
9.9.1 Unidade de Quantidade de Movimento	94
9.9.2 Impulso e variação na quantidade de movimento	94
9.9.2.1 Unidade de Impulso	96
9.9.3 Conservação da Quantidade de Movimento	96
 10 Gravitação Universal	97
10.1 Leis de Kepler	100

10.2 Lei da gravitação universal de Newton.....	102
10.3 Atração da Terra sobre a Lua.....	104
10.4 Atração da Lua sobre a Terra.....	106
11 Estática.....	107
11.1 Conceito de Força	107
11.2 Equilíbrio de ponto material	107
11.3 Equilíbrio de corpo extenso	108
11.3.1 Momento de uma força ou torque.....	108
11.3.2 Sentido do vetor momento de uma força.....	109
11.3.3 Condições de equilíbrio de um corpo extenso.....	110
11.3.4 Centro de Massa, Centro de Gravidade e Centro Geométrico	111
11.3.4.1 Determinação do centro de massa de um corpo.....	112
11.3.5 Centro de gravidade de um corpo.....	115
11.3.6 Tipos de equilíbrio	116
12 Hidrostática	117
12.1 Densidade de um fluido	118
12.1.1 Unidades de Densidade	118
12.2 Pressão num sólido	118
12.2.1 Unidades de Pressão	119
12.3 Pressão em um fluido	119
12.3.1 Consequências da Lei de Stevin.....	120
12.4 Pressão atmosférica	121
12.4.1 Unidade de Pressão atmosférica	123
12.4.2 Medidores de Pressão	123
12.5 Princípio de Pascal.....	124
12.6 Princípio de Arquimedes	127
13 Ondulatória	128
13.1 Introdução	128
13.2 Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas	128
13.2.1 Ondas Longitudinais e Ondas Transversais	129
13.2.2 Grandezas a serem consideradas no estudo de uma onda	129
13.2.3 Raios e Frentes de Ondas bidimensionais e tridimensionais	131
13.2.4 Refração, interferência e reflexão em ondas unidimensionais.	132
13.2.5 Refração, reflexão e interferência em ondas bidimensionais.....	137
13.2.6 Difração de ondas.....	140
14 Termologia	141
14.1 Os termômetros	142
14.2 Escalas Temométricas	142
14.3 Dilatação térmica	144
14.4 Calor	148
14.4.1 Calor sensível	149
14.4.2 Calor latente.....	151

14.5 Trocas de calor	153
14.5.1 Calorímetros	154
14.6 Propagação do calor.....	154
14.6.1 Condução	155
14.6.2 Convecção.....	158
14.6.3 Radiação.....	160
14.6.3.1 Lei da radiação de Kirchhoff e definição de corpo negro	162
14.6.3.2 Lei de Stefan-Boltzmann e Lei de deslocamento de Wien	163
 15 Termodinâmica	165
15.1 Gases perfeitos.....	166
15.2 Transformações gasosas.....	168
15.3 Primeira Lei da Termodinâmica.....	172
15.4 Segunda Lei da Termodinâmica.....	176
 16 Óptica Geométrica	180
16.1 Princípios básicos	180
16.2 Espelhos Planos	188
16.2.1 Leis da reflexão	188
16.2.2 Construção de imagens em espelhos planos.....	189
16.2.3 Translação de um espelho plano.....	191
16.2.4 Rotação de um espelho plano	193
16.2.5 Associação de espelhos planos.....	193
16.3 Espelhos Esféricos	194
16.3.1 Elementos de um espelho esférico.....	195
16.3.2 Os focos de um espelho esférico	196
16.3.3 Formação de imagens em espelho esférico	199
16.3.4 Características das imagens formadas em espelho esférico	200
16.3.5 A Equação de Conjulação de Gauss	203
16.3.6 A Equação do aumento linear transversal.....	204
16.4 Leis da refração da luz	205
16.4.1 Lei de Snell-Descartes.....	207
16.4.2 Reflexão Total.....	208
16.4.3 Dióptros planos.....	208
16.5 Lentes Esféricas	212
16.5.1 Elementos de uma lente esférica	214
16.5.2 Vergência, Convergência ou Grau de uma lente.....	215
16.6 O olho humano e os defeitos da visão.....	215
16.7 Condições de estigmatismo de uma lente esférica	218
16.8 Focos de uma lente esférica.....	218
16.9 Referencial de Gauss para o estudo das lentes	219
16.10 Formação de imagens nas lentes esféricas.....	219
16.11 Características das imagens formadas por lentes esféricas	222
16.12 Aumento Linear Transversal	224
16.13 Instrumentos ópticos de observação.....	224
16.14 Instrumentos ópticos de projeção	227

17 Eletrostática.....	229
17.1 carga elétrica.....	229
17.2 princípio da atração e repulsão de cargas elétricas	231
1.17.3 princípio da conservação de cargas elétricas	231
17.4 condutores e isolantes elétricos	232
17.5 Processos de eletrização.....	233
17.5.1 eletrização por atrito.....	234
17.5.2 eletrização por contato.....	236
17.5.3 Eletrização por indução	236
17.6 Lei de coulomb	237
17.6.1 Força elétrica resultante	238
17.7 Campo elétrico.....	239
17.7.1 Campo Elétrico gerado por diferentes cargas elétricas	241
17.8 Diferença de Potencial elétrico.....	241
17.8.1 Potencial elétrico gerado por diferentes cargas elétricas	243
 18 Eletrodinâmica	 244
18.1 Corrente elétrica.....	244
18.1.1 Efeitos da Corrente elétrica.....	246
18.2 Leis de Ohm	247
18.2.1 Primeira Lei de Ohm.....	247
18.2.2 Segunda Lei de Ohm.....	248
18.3 Circuitos elétricos.....	249
18.3.1 Tipos de circuitos	251
18.3.2 Resistência equivalente	253
18.4 Potência elétrica dissipada.....	255
 19 Eletromagnetismo	 257
19.1 Magnetismo	257
19.1.1 Campo Magnético.....	259
19.2 A interação campo magnético e corrente elétrica	262
19.2.1 Força sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica.....	264
19.2.2 Corrente elétrica percorrendo um condutor na forma de uma bobina e de um solenoide	266
19.3 Indução Eletromagnética	268
19.3.1 Fluxo magnético.....	268
19.3.2 Lei de Faraday e Lei de Lenz.....	270
19.4 Aplicações das Leis de Faraday e Lenz.....	271
19.4.1 Geradores eletromagnéticos	272
19.4.2 Transformadores de Tensão.....	273

FÍSICA

1 O QUE É A FÍSICA?

1.1 INTRODUÇÃO

Olá! Aqui iniciamos o nosso estudo sobre a Física. Mas o que é a Física? Bem, para definirmos a Física de maneira bem simples, podemos dizer que ela é a Ciência que estuda os fenômenos naturais mais gerais, buscando descrevê-los, explicá-los e prevê-los. Para tanto, utiliza-se da matemática como linguagem básica.

Uma imagem que normalmente se faz da Física é que quando uma determinada teoria é comprovada cientificamente temos o estabelecimento de uma verdade absoluta. Isso não é verdade. A Ciência é uma construção humana e, por isso, sujeita a erros. É claro que existem critérios rígidos para que uma teoria possa ser considerada científica e, por isso, as teorias ganham *status* de verdade. Porém, ao olharmos fatos da história da Ciência observamos as correções e alterações que muitas teorias, um dia consideradas verdadeiras, tiveram de passar com o surgimento de resultados de pesquisas realizadas posteriormente. Algumas delas foram até mesmo abandonadas e substituídas por outras novas teorias.

A ideia que normalmente se faz dos físicos como gênios, malucos, completamente isolados da realidade e mergulhados somente no mundo da Ciência, também é um mito. Nenhum conhecimento científico é obra de um único cientista. Sua atividade de pesquisa se baseia no trabalho de outros que o antecedeu e de seus pares atuais que criticam, discutem e propõem aperfeiçoamentos nos trabalhos de pesquisa realizados.

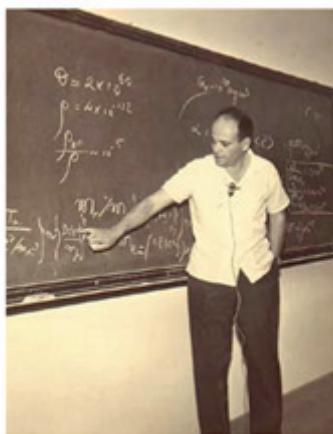


Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Cartoon>

Figura 1 – Visão de Físico maluco: ao mesmo tempo genial e desconectado da realidade

Como se pode ver, a Física constrói seus conhecimentos a partir de ações de uma comunidade denominada científica. Nesse sentido, ela é uma construção humana em que vários estudiosos trazem suas contribuições para elaboração de teorias e modelos que buscam explicar, descrever e prever os fenômenos da natureza.

Primeiro, em função de demandas sociais os físicos buscam respostas para problemas que afetam a sociedade. Nesse caso, estudos bibliográficos e hipóteses são levantados e testados; grandezas são identificadas e medidas em experimentos e levantamentos de dados são realizados. Porém, o mais importante é a elaboração dos modelos científicos, ou seja, representações mentais que derivam em leis, princípios, regras, teorias na tentativa de justificar os dados obtidos. Os cientistas, nesta fase da sua atividade, buscam construir argumentos com base em referenciais teóricos já reconhecidos pela comunidade científica. Dessa forma, tentam convencer outros membros da comunidade que suas idealizações sobre o fenômeno estudado se justificam. Quanto mais refinado, detalhado e justificado forem seus argumentos maior possibilidade o cientista terá de convencer seus pares de que suas ideias acerca do fenômeno estudado merecem ser consideradas em outros estudos.

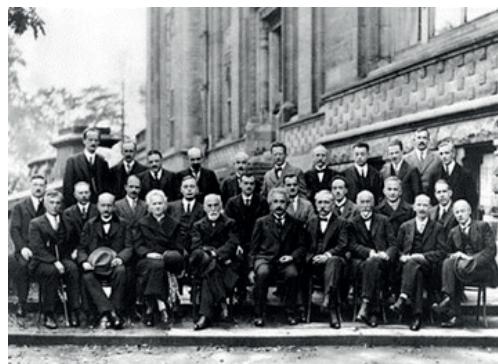


Fonte: www.algosobre.com.br/biografias

Figura 2 – César Lattes, um dos mais importantes físicos brasileiros

Dessa forma, um modelo, uma explicação, não ganha o *status* de verdade científica sem que diferentes testes, debates e discussões no contexto da comunidade científica tenham sido realizados. Os cientistas realizam congressos, seminários, escrevem artigos, enfim, criam muitas oportunidades nas quais se podem comparar, analisar, testar e discutir os modelos e teorias que são criadas para justificar os dados obtidos em diferentes experiências. Dessa forma, uma lei, um conceito, um princípio ou regra, só assume a condição de científica depois de passar por todas essas fases de

construção e, fundamentalmente, de convencimento da grande maioria de cientistas que compõe a comunidade científica de que tal explicação é a mais correta.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Confer%C3%A7a_de_Solvay

Figura 3 – Grandes cientistas reunidos em um importante congresso de Física realizado em Solvay em Bruxelas em 1927

Mesmo que uma teoria seja vencedora, ou seja, considerada correta pelos membros da comunidade científica, isso não garante de que ela seja considerada verdadeira absoluta, válida para sempre. Isso porque, ao longo do tempo, outras pesquisas serão realizadas, novos dados serão levantados e, se evidências surgirem de que tal modelo já não seja mais capaz de explicá-las, os cientistas trabalharão no sentido de propor novos modelos que consigam explicar todos os dados que o modelo antigo explicava e mais os novos resultados que este não foi capaz de justificar.

É interessante notar que para cada problema gerador de pesquisas e estudos, novos problemas e questões são gerados. Aliás, para os cientistas, uma teoria científica é considerada boa se, além de respostas, apresenta questões que suscitem novas pesquisas e estudos. Por isso, há muitas e diferentes áreas de pesquisa em Física.

De forma geral e, para efeito dos conteúdos que vamos estudar em nossas aulas de Física, podemos dividir os estudos da Física nas seguintes áreas:

- Mecânica: área da Física que estuda os movimentos e o equilíbrio de corpos rígidos e de fluidos, preocupando-se em descrevê-los, explicar suas causas e condições de ocorrência na natureza.
- Ondulatória: área da Física que estuda processos de propagação de toda ou qualquer perturbação de um meio e de fenômenos periódicos
- Termodinâmica: área da Física que estuda as trocas de calor e a capacidade delas em realizar trabalho.
- Eletromagnetismo: área da Física que estuda os fenômenos elétricos e magnéticos e a interação entre eles.

- Óptica: é a parte da Física que estuda os fenômenos luminosos, efeitos e a natureza da luz.

Contudo, atualmente, muito mais áreas da Física existem, dentre elas podemos citar: Física de Plasma, Física da Matéria Condensada, Física de Partículas, Astrofísica, Física da Atmosfera, etc.

Cabe destacar que o conhecimento científico promoveu o avanço tecnológico, ou seja, uma série de equipamentos, aparelhos, máquinas, processos foram implementados na sociedade. Normalmente esses produtos do desenvolvimento científico são vistos como conquistas positivas e com consequências boas para toda a sociedade. Contudo, nem sempre isso é verdade. Se os conhecimentos construídos pela Mecânica e pela Termodinâmica possibilitaram a construção de máquinas que facilitaram nossas vidas, também é preciso destacar que trouxeram problemas como a questão do desemprego e da poluição.



Figura 4 – Impactos positivos e negativos da Ciência na sociedade

Assim as contribuições do desenvolvimento científico e tecnológico para a sociedade precisam ser avaliadas e analisadas criteriosamente e de forma crítica. Por isso, ao aprender os conhecimentos científicos não perca a oportunidade de fazer uma análise da relação que estes têm com a tecnologia e o respectivo impacto que tiveram na sociedade.

Portanto, o conhecimento científico está longe oferecer respostas a todas as questões humanas. Questões fundamentais como: existe vida após a morte? Existia vida antes de nascermos? Se existe vida após a morte, ou antes, de nascermos, porque estamos aqui? Existem ao lado de outras menos complexas e que a Física não é capaz de responder como: porque existe a atração gravitacional? Porque cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem? Será que não existe nada no universo que se mova mais rápido que a luz?

Portanto, há outras formas de construção de conhecimento que os seres humanos utilizam e que, cada uma à sua maneira, busca e dá respostas, dentre elas podemos citar: as religiões, os mitos, o senso-comum, etc.

Essas formas de conhecimento não são melhores e nem piores que a Física, porém apresentam características e metodologias bem diferentes dos processos que a Ciência adota para a construção de suas conclusões.

As diferenças básicas entre a Física e as outras formas de produção de conhecimento não científicas são:

- A necessidade que a Física tem de apresentar modelos que, para serem aceitos, precisa passar por diferentes processos de discussão, crítica e até mesmo reformulações;
- Os modelos científicos, à medida que há evolução do saber científico, necessitam passar por reformulações e aprimoramentos. Portanto, não há conhecimentos científicos definitivos e, portanto, considerados dogmas intocáveis;
- Utiliza uma linguagem própria, com símbolos e representações típicas das convenções estabelecidas pela comunidade científica, com uma estrutura de argumentação e de justificativas características que diferem de outras formas de culturas que adotam discursos com outra organização e método de convencimento.

Enfim, a Física é uma construção humana e, como tal limitada, que está longe de apresentar todas as respostas do ser humano e de descrever verdadeiramente toda a realidade na qual vivemos. Apresenta regras e linguagem próprias de uma comunidade científica e constrói conhecimentos que servem de paradigma para o desenvolvimento de tecnologias que impactam significativamente nossas vidas. Ao longo da história temos diferentes exemplos de como o desenvolvimento científico e tecnológico influenciou formas de pensar, mudou visões de mundo e transformou práticas sociais, políticas e econômicas.

Por isso, aprender Física é fundamental não apenas para passar no vestibular, mas também, para exercer a cidadania de forma crítica e responsável.

2 MEDIDAS FÍSICAS?

Como vimos, os estudos da Física consistem em pesquisas realizadas e validadas pela comunidade científica. Nesses trabalhos de investigação, análises qualitativas e quantitativas de fenômenos naturais são realizadas. As análises qualitativas servem para que os físicos observem os fenômenos e identifiquem neles as grandezas

variáveis e constantes durante a ocorrência do fenômeno. Enquanto que as análises quantitativas referem-se à realização de medidas

2.1 MAS O QUE SÃO GRANDEZAS FÍSICAS?

Podemos definir grandezas como sendo características ou aspectos próprios de um fenômeno que são fundamentais para sua ocorrência e despertam a atenção do cientista. Assim, quando um cientista observa um fenômeno seu ponto de vista não é geral, ou seja, ele não olha um fenômeno com um todo, ele se concentra em alguns aspectos em particular que lhe desperta mais atenção. Por exemplo, quando se observa algo em movimento, o físico se preocupa com a distância percorrida, o tempo gasto para percorrê-la, a velocidade com que se move, se a velocidade é sempre a mesma, ou se muda ao longo do movimento, etc.

Todas essas características são grandezas. As grandezas, para serem consideradas como físicas pela comunidade científica, devem poder ser medidas de forma concreta, ou seja, devem propiciar a ocorrência de pesquisas de caráter quantitativo.

2.2 O SIGNIFICA MEDIR GRANDEZAS FÍSICAS?

Medir é comparar uma grandeza com um padrão tomado como referência e, a partir daí, relacionar um número que indique quantas vezes a grandeza contém esse padrão. Nesse caso o padrão é tomado como unidade de medida.

As medidas podem ser feitas de forma direta ou indireta. Uma medida direta é feita quando há a comparação entre a grandeza a ser medida com o padrão. Porém, quando a medida é obtida por operações matemáticas dizemos que ela é indireta.

2.3 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Na antiguidade existia um problema muito grande para o comércio que era a inexistência de padrões únicos para fazer medidas. Cada um usava um padrão diferente. Em 1960 foi criado o Sistema internacional de Unidades (SI).

Nesse sistema as grandezas fundamentais são: o comprimento, a massa, o tempo, a intensidade de corrente elétrica, a temperatura, a quantidade de matéria e a intensidade luminosa. Nesse caso, os físicos definiram unidades para essas grandezas. As demais grandezas têm unidades derivadas dessas grandezas fundamentais.

Tabela 1 – Grandezas fundamentais e suas respectivas unidades definidas pelo SI

Grandeza de base	Símbolo	Unidade de base	Símbolo
comprimento	<i>x</i>	metro	m
massa	<i>m</i>	quilograma	kg
tempo, duração	<i>t</i>	segundo	s
corrente elétrica	<i>I, i</i>	ampere	A
temperatura termodinâmica	<i>T</i>	kelvin	K
quantidade de substância	<i>n</i>	mol	mol
intensidade luminosa	<i>I_v</i>	candela	cd

Fonte: <https://qualidadeonline.wordpress.com/tag/informacao-cientifica-2/page/5/>

Tabela 2 – Algumas grandezas derivadas e suas respectivas unidades definidas pelo SI

Grandeza derivada	Símbolo	Unidade derivada	Símbolo
área	<i>A</i>	metro quadrado	<i>m</i> ²
volume	<i>V</i>	metro cúbico	<i>m</i> ³
velocidade	<i>v</i>	metro por segundo	<i>m/s</i>
aceleração	<i>a</i>	metro por segundo ao quadrado	<i>m/s</i> ²
número de ondas	<i>σ, v̄</i>	inverso do metro	<i>m</i> ⁻¹
massa específica	<i>ρ</i>	quilograma por metro cúbico	<i>kg/m</i> ³
densidade superficial	<i>ρ_s</i>	quilograma por metro quadrado	<i>kg/m</i> ²
volume específico	<i>v</i>	metro cúbico por quilograma	<i>m</i> ^{3/kg}
densidade de corrente	<i>j</i>	ampere por metro quadrado	<i>A/m</i> ²
campo magnético	<i>H</i>	ampere por metro	<i>A/m</i>
concentração	<i>c</i>	mol por metro cúbico	<i>mol/m</i> ³
concentração de massa	<i>ρ, γ</i>	quilograma por metro cúbico	<i>kg/m</i> ³
luminância	<i>L_v</i>	candela por metro quadrado	<i>cd/m</i> ²
índice de refração	<i>n</i>	um	1
permeabilidade relativa	<i>μ_r</i>	um	1

Fonte: <http://wiki.stoa.usp.br/>

2.4 PRECISÃO DE UMA MEDIDA

Uma medida precisa, ou seja, com o menor erro possível, depende dos instrumentos de medida que se tem à disposição, além da competência daquele que irá realizar a medida.

A competência do medidor está relacionada com seu conhecimento sobre o uso do instrumento de medida e seus cuidados ao fazer a leitura do instrumento.

Com relação à precisão dos instrumentos de medidas elas dependem do número de divisões que apresenta. Observe o exemplo a seguir:

Considere uma régua, cuja menor divisão seja o centímetro, como indicado na figura a seguir:

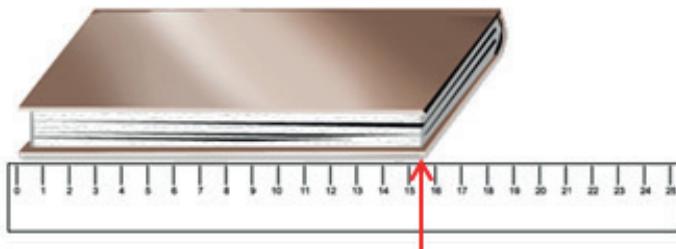


Figura 1 – Medida de um livro

Note que a medida do livro fica entre 15 e 16 cm. Para uma medida mais precisa, necessitariam de um instrumento de medida com um número maior de divisões. No caso, se dividíssemos o centímetro em 10 partes, obteríam uma régua graduada em milímetros. Nesse caso, a precisão do instrumento seria maior.

2.5 INCERTEZA NA MEDIÇÃO

Ao se realizar qualquer medida de uma grandeza física não se pode ter certeza absoluta quanto à sua exatidão. Por isso, nenhuma medida pode ser considerada, de fato, exata.

Mas como, ao medirmos a intensidade ou módulo de uma grandeza física, atribuindo a ela um número e uma unidade, podemos ter alguma confiança no valor obtido?

Para obter essa confiança em todas as medidas realizadas, os físicos, além de métodos estatísticos que minimizam a possibilidade de erros, expressam a incerteza da medição realizada, informando o intervalo de valores na qual a medida tem maior possibilidade ser exata.

No exemplo acima, se considerarmos a metade da menor divisão do instrumento de medida obteremos 0,5 cm. Nesse caso, a medida do livro pode ser expressa da seguinte forma:

$$15,5 \pm 0,5\text{cm}$$

Ou seja, a medida indicada expressa um intervalo no qual a medida exata do livro se encontra. O valor 15 é aquele no qual o medidor tem certeza. O algarismo 5 é duvidoso. Porém, com a indicação da incerteza $\pm 0,5$ cm, expressa com convicção o intervalo no qual a medida obtida é confiável.

2.6 ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS

Podemos definir algarismos significativos como aqueles que, de fato, têm significado numa medida. Eles se constituem dos algarismos relativos obtidos da medida que se tem certeza, acrescida do algarismo duvidoso.

Por exemplo, imagine que você tenha que medir um pêndulo de grande comprimento como o representado na figura a seguir:

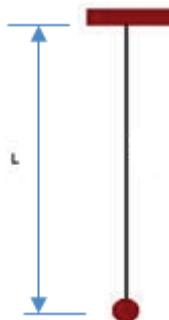


Figura 2 – Medida de um pêndulo

Costuma-se afirmar que o seu comprimento envolve o comprimento do fio mais a metade do diâmetro da esfera ligado à sua extremidade. Digamos que você meça o comprimento do fio com um instrumento cuja menor divisão da escala é dada em centímetros e que meça o diâmetro com uma régua cuja menor divisão é o milímetro.

Vamos admitir que você obtivesse para o comprimento do fio uma medida igual a 208 cm. Isso faz você expressar sua leitura da seguinte forma: **208,0 ± 0,5cm**

Note que 2,0 e 8 são os algarismos que você tem certeza. O algarismo 0, depois da vírgula, é o duvidoso.

Admitamos que, ao medir o diâmetro da esfera amarrada ao fio, você obtenha 60 mm. Ou seja, um raio de 30 mm. Isso faz você expressar sua leitura da seguinte forma:

$$30,0 \pm 0,5 \text{ mm ou}$$

$$3,00 \pm 0,05 \text{ cm}$$

Note que 3 e o primeiro 0 são os algarismos que você tem certeza. O segundo algarismo 0 é o duvidoso.

Ao somar as duas medidas para obter o comprimento do pêndulo você faz
208,0 cm + 9,00 cm = 211,00 cm

Perceba que, como o segundo 0, depois da vírgula, é de uma precisão maior do que aquela obtida na medida do fio, ele não é significativo, logo, a medida deve ser expressa com os algarismos obtidos com o instrumento menos preciso: **211,0 ± 0,5 cm**

Um método bastante simples para realizarmos operações com algarismos significativos é adicionar um x à direita do algarismo duvidoso de qualquer medida, antes de realizar a operação. Assim, após a operação, considere os algarismos que não foram afetados pelo x.

Se for necessário fazer arredondamentos, use a seguinte regra: Se o número à direita do ponto de arredondamento é:

- a) 0, 1, 2, 3, 4 → Simplesmente elimina-se a parte à direita;
- b) 5, 6, 7, 8, 9 → Incrementa o algarismo à esquerda e elimina a parte à direita.

2.7 REPRESENTAÇÃO DE UM NÚMERO A PARTIR DE UMA NOTAÇÃO CIENTÍFICA

Na Física, ou mesmo em outras ciências, é natural obtermos medidas de números muito pequenos ou números muito grandes. Por isso, é natural eles serem indicados de uma forma mais compacta, denominada notação científica que utiliza a potência de dez para representar os números. Portanto, um número expresso em notação científica deve ser expresso da seguinte forma:

$$\mathbf{n} \times 10^y$$

Onde n é um número compreendido no intervalo igual a:

$$1 \leq n < 10$$

Para obtermos o número y, temos a seguinte regra:

- Conta-se o número de casas que a vírgula deve ser deslocada para a esquerda; este número nos fornece um expoente positivo de 10;
- Conta-se o número de casas que a vírgula deve ser deslocada para a direita; este número fornece um expoente negativo de 10.

Assim, observe os exemplos a seguir:

O número 1500000 pode ser escrito em notação científica da seguinte forma: **$1,5 \times 10^6$** .

Já o número, 0,0000015 pode ser escrito em notação científica da seguinte forma: **$1,5 \times 10^{-6}$** .

2.8 O USO DE PREFIXOS NA REPRESENTAÇÃO DE MEDIDAS

O uso de a notação científica facilita também, o uso de prefixos de múltiplos e submúltiplos muito utilizados em nosso dia-a-dia. Na época de nossos avós, já era muito natural a utilização desses prefixos, tais como: deca, hecto, quilo, mega, mili, cent, deci, etc. Hoje, com o desenvolvimento da informática e da microeletrônica, convivemos diariamente com outros prefixos como: tera, giga, pico, nano, etc.

Em 1991, por recomendação da 19ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, os seguintes prefixos foram adotados como norma:

Tabela 3 – Principais prefixos, seus símbolos e seus fatores de conversão

Fator	Nome	Símbolo	Fator	Nome	Símbolo
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	quilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

Fonte: <http://wiki.stoa.usp.br/>

3 GRANDEZAS VETORIAIS

Como vimos, as grandezas físicas constituem-se no alvo da observação dos cientistas para a realização de seus estudos e investigações dos fenômenos. Até agora, vimos como caracterizar grandezas a partir de um número e sua unidade, ou seja, definindo seu módulo ou intensidade através de medidas. Grandezas que só necessitam do módulo para serem plenamente definidas são denominadas de escalares. Exemplo: temperatura, tempo, área, volume, etc.

Porém, há grandezas que precisam de mais informações, além de seu módulo, para ficarem bem caracterizadas. Elas necessitam de definições geométricas que indiquem sua direção e sentido. Essas grandezas são chamadas de grandezas vetoriais. Exemplo: velocidade, força, aceleração, deslocamento, etc.

As grandezas vetoriais, além do módulo necessitam de uma representação geométrica que denominamos vetor.

Para entendermos melhor essa definição, imagine 4 carros; A, B, C e D, que se movem com velocidades respectivamente iguais a $\vec{V_A}$, $\vec{V_B}$, $\vec{V_C}$ e $\vec{V_D}$, como é representado na figura a seguir:

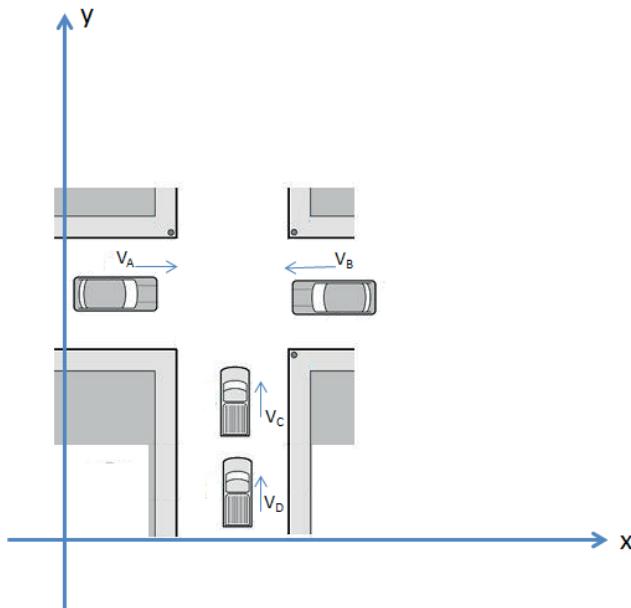


Figura 1 – carros que se movem em diferentes direções e sentidos

Note que os carros A e B se movem ao longo da reta X, e que os carros C e D se movem ao longo da reta y. Portanto dizemos que A e B se movem na mesma

direção, na direção de x. Enquanto que C e D se movem na mesma direção, na direção de y.

Porém, é possível notar que C e D, além de se moverem na mesma direção, ambos se deslocam ao longo de y positivo, ou seja, têm também o mesmo sentido. Já A e B, apesar de se moverem na mesma direção x, se movem sem sentidos contrários: A se move ao longo de x positivo enquanto B se move ao longo de x negativo. Por isso, as setas nos ajudam a entender a direção e o sentido da grandeza velocidade de cada automóvel.

3.1 DEFINIÇÃO DE VETOR

Podemos dizer que um vetor é uma representação geométrica de uma grandeza física vetorial que, para ficar bem caracterizada, precisa da definição de módulo (número e unidade), direção e sentido. Assim, um vetor é um segmento de reta, cujo comprimento representa o módulo da grandeza, o ângulo que o segmento de reta faz com a horizontal indica a direção da grandeza, e a orientação da seta indica o sentido.

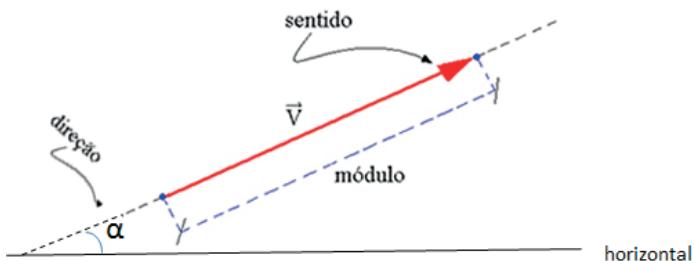


Figura 2 – Características de um vetor

As grandezas vetoriais também são representadas por uma letra com uma seta em cima, por exemplo: \vec{V} . O Módulo de uma grandeza vetorial pode ser representado pela letra sem a seta em cima ou pela letra com seta em cima entre dois traços laterais. Portanto, o módulo do vetor \vec{V} pode ser representado das seguintes formas: V ou $|\vec{V}|$.

3.2 VETOR RESULTANTE

Vamos agora imaginar um ponto qualquer, no qual vários vetores, de diferentes intensidades, direção e sentido, atuam. Se substituirmos esses vetores por um único vetor capaz de provocar o mesmo efeito que todos os outros vetores juntos, então essa novo vetor será chamado de vetor resultante.

Mas como determinarmos um vetor resultante? Ou seja, determinarmos sua intensidade, direção e sentido?

Há, basicamente, três métodos para a determinação de um vetor resultante:

- O método do polígono;
- O método do paralelogramo;
- O método da decomposição no sistema cartesiano.

3.2.1 O MÉTODO DO POLÍGONO

É um método que consiste em organizar as representações vetoriais de tal forma a obter um polígono. Para tanto, devemos seguir o seguinte critério, utilizando uma régua e um transferidor, desenha-se o primeiro vetor a partir de um ponto previamente escolhido. A partir da extremidade desse primeiro vetor, o próximo é desenhado e assim sucessivamente até o último vetor. O vetor resultante, \vec{R} , é determinado pela origem do 1º vetor e pela extremidade do último vetor traçado. Veja o esquema a seguir:

Considere os vetores \vec{a} e \vec{b} a seguir:

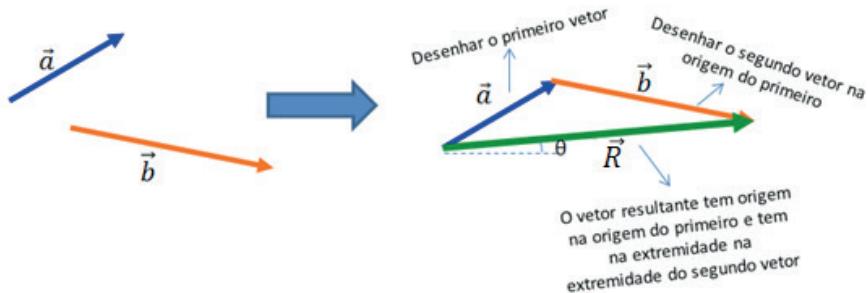


Figura 3 –Representando o vetor resultante pelo método do polígono

Após o desenho da resultante, utilizando a régua e o transferidor, se pode determinar o módulo e a direção do vetor resultante. O sentido do vetor \vec{R} é dado pelo desenho.

3.2.2 O MÉTODO DO PARALELOGRAMO

Este método é utilizado para obter o vetor resultante de dois vetores. Se você tiver vários vetores atuando e precisar determinar o vetor resultante, deverá utilizar esse método por partes, ou seja, determinando a resultante de dois em dois vetores. Veja o exemplo a seguir.

Considere os vetores a seguir:

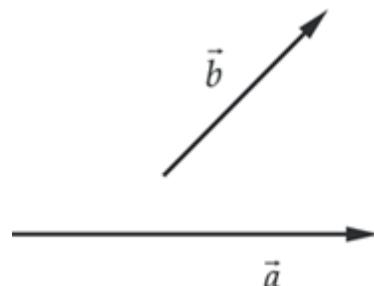


Figura 4 – Dois vetores \vec{a} e \vec{b}

Para determinarmos o vetor resultante, utilizando o método do paralelogramo, devemos seguir os passos:

Traçamos os vetores \vec{a} e \vec{b} com as origens coincidindo no mesmo ponto, mantendo seus módulos, direções e sentidos.

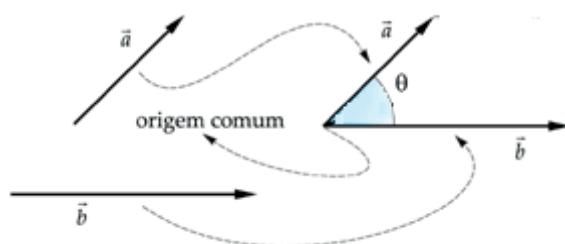


Figura 5 – Organização dos vetores de modo que suas origens coincidam no mesmo ponto

Pela extremidade do vetor \vec{a} , traçamos uma reta paralela ao vetor \vec{b} e pela extremidade do vetor \vec{b} , traçamos uma reta paralela ao vetor \vec{a} .

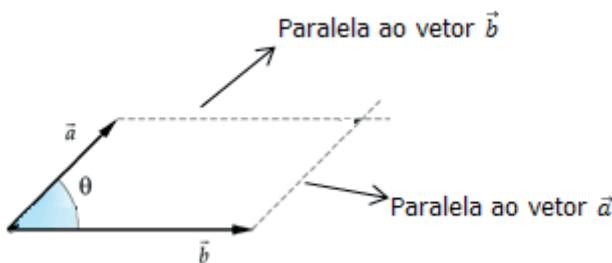


Figura 6 – Traçando paralelas aos vetores \vec{a} e \vec{b}

O vetor resultante \vec{R} será obtido unindo a origem dos dois vetores \vec{a} e \vec{b} com o encontro das paralelas.

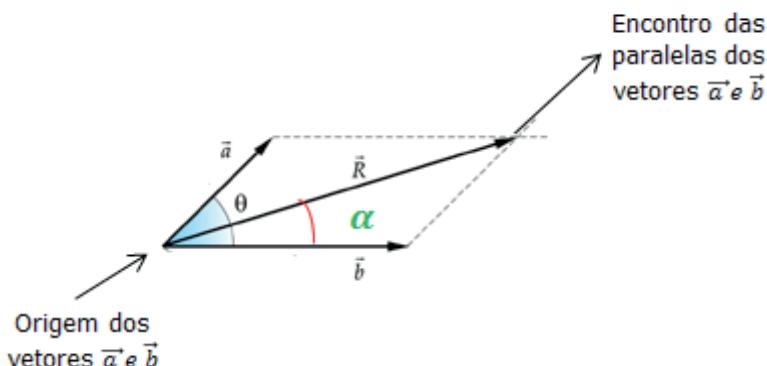


Figura 7 – Representando o vetor resultante pelo método do paralelogramo

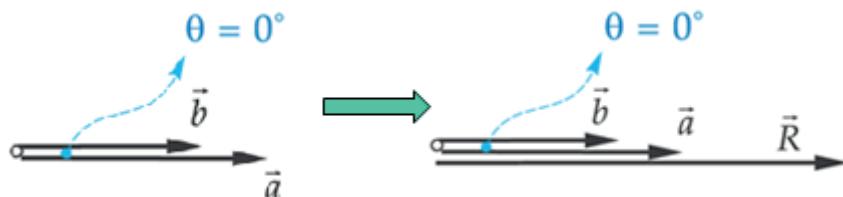
O módulo do vetor \vec{R} será calculado pela expressão abaixo, obtida a partir da lei dos cossenos.

$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \theta}$$

Onde θ é o ângulo formado pelos vetores \vec{a} e \vec{b} e $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

A determinação da direção do vetor \vec{R} pode ser feita mediante o cálculo do ângulo α :

Caso 1 – os vetores \vec{a} e \vec{b} têm o mesmo sentido, ou seja, $\theta = 0^\circ$



$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos 0^\circ}$$

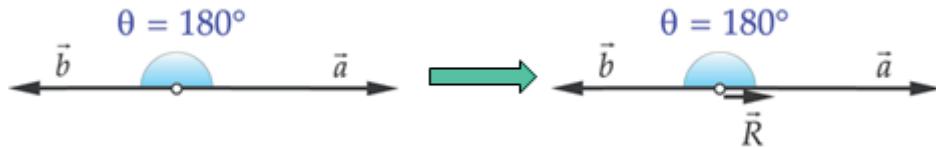
Como $\cos 0 = 1$ $\cos 0 = 1$, então:

$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab}$$

Logo:

$$R = |\vec{R}| = a + b$$

Caso 2 – os vetores \vec{a} e \vec{b} e \vec{a} e \vec{b} sentidos contrários, ou seja, $\theta = 180^\circ$ $\theta = 180^\circ$



$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos 180^\circ}$$

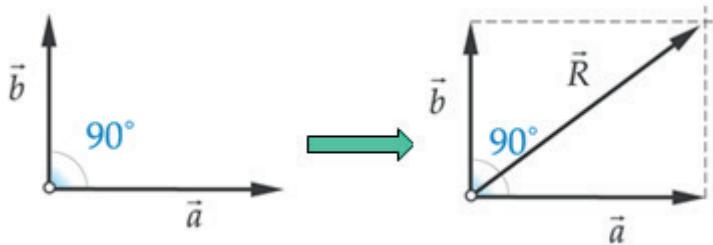
Como $\cos 180^\circ = -1$ $\cos 180^\circ = -1$, então:

$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab}$$

Logo:

$$R = |\vec{R}| = a - b$$

Caso 3 – os vetores \vec{a} e \vec{b} têm direções perpendiculares entre si, ou seja, $\theta = 90^\circ$



$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos 90^\circ}$$

Como $\cos 90^\circ = 0$ $\cos 90^\circ = 0$, então:

$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2 + 0}$$

Logo:

$$R = |\vec{R}| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

3.2.3 O MÉTODO DA DECOMPOSIÇÃO NO SISTEMA CARTESIANO

Todo vetor, plano, pode ser representado por dois outros vetores, quando fazemos sua decomposição nos eixos cartesianos. Nesse caso esses dois vetores são chamados de componentes horizontal e vertical. Veja a figura a seguir:

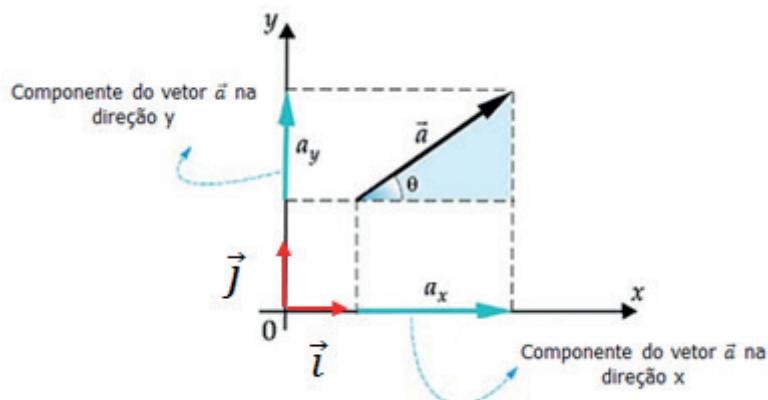


Figura 8 – Decompondo o vetor no sistema cartesiano

Nesse caso, nós podemos definir vetores unitários \vec{i} e \vec{j} . Assim, o vetor \vec{a} , pode ser escrito da seguinte forma:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j}$$

Sendo que:

$$\cos \theta = \frac{\text{cateto oposto}}{\text{hipotenusa}} = \frac{a_y}{a}$$

Então:

$$a_y = a \cos \theta$$

Sendo que:

$$\sin \theta = \frac{\text{cateto adjacente}}{\text{hipotenusa}} = \frac{a_x}{a}$$

Então:

$$a_x = a \sin \theta$$

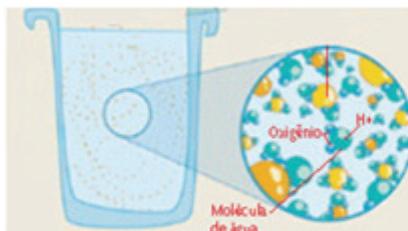
4 INTRUÇÃO AO ESTUDO DO MOVIMENTO DA CINEMÁTICA

A Cinemática é uma área de estudo da Física que estuda o movimento, buscando descrevê-lo sem preocupar-se com suas causas.

O movimento é um fenômeno comum em nosso universo. Pode-se dizer, com toda certeza que tudo nele está em movimento.

Por exemplo: agora mesmo, você que está agora parado, lendo este texto, está localizado sobre a superfície da Terra que, por sua vez, gira em torno de si mesma e, também em torno do Sol. Dessa forma, juntamente com todo o sistema solar, você movimenta-se através do universo.

Além disso, temos que considerar que, todos os corpos, mesmo aquele que aparentemente estejam parados, um copo com água, por exemplo, são constituídos de moléculas e átomos que estão sempre em movimento.



Fonte: www.gentequeeduca.org.br

Figura 1 – Um copo com água é constituído de átomos que estão em contínuo movimento

O objetivo deste capítulo, contudo, não é o estudo de movimentos tão complexos – vamos nos restringir a movimentos bem mais simples, buscando, inicialmente descrever suas características mais importantes como trajetória, velocidade, aceleração, etc. A intenção é que você possa melhor observar e compreender os movimentos que vê diariamente.

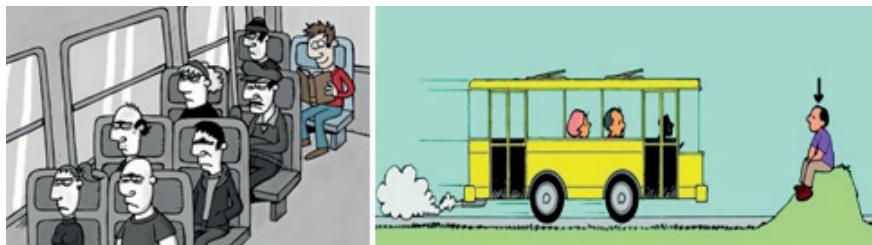
4.1 SISTEMAS DE REFERÊNCIAS

Se de fato tudo está em movimento como podemos explicar que algumas coisas nos parecerem paradas?

Está é uma pergunta importante e, para respondê-la, é preciso que você conheça o conceito de sistema de referência ou, simplesmente, referencial.

Para entendermos bem o que é referencial, pense na seguinte situação propostas a seguir:

Um ônibus movimenta-se por uma estrada. Seus passageiros estão, todos, sentados. Eles estão parados ou em movimento?



Fonte: www.estudopratico.com.br

Figura 2 – Pessoas dentro e fora de um ônibus em movimento

Na primeira situação, temos pelo menos dois pontos de vista de observação: uma pelos olhos de quem está dentro do ônibus e outra para quem está fora dele. Note que, para quem está dentro do ônibus, as pessoas parecem estar em repouso.

Isso porque em relação a qualquer uma delas, nenhum outro passageiro altera sua posição no decorrer do tempo. Por outro lado, para alguém do lado de fora do ônibus todos os passageiros alteram sua posição à medida que o tempo passa. Assim, para quem vê o ônibus do lado de fora dele os passageiros estão todos em movimento.

É comum, portanto, no estudo de fenômenos, recorrermos a um conjunto de pontos ou de corpos a partir do qual tomamos como referencial. É a partir dele que realizamos nossas observações.

Em Física, utilizamos o sistema de eixos cartesianos (x , y e z) para representar o sistema de referências escolhido para realizar o estudo.

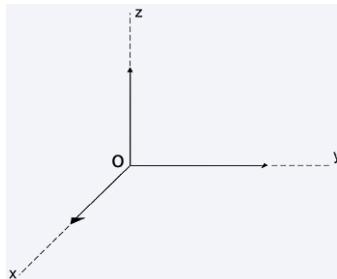


Figura 2 – Sistema cartesiano utilizado como sistema de referência

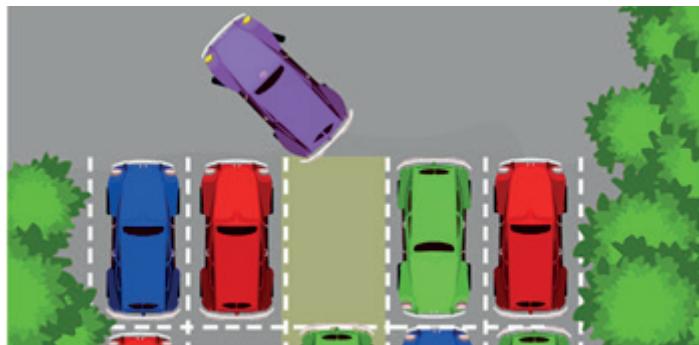
4.2 PONTO MATERIAL E CORPO EXTENSO

Em Física buscamos sempre utilizar uma linguagem mais objetiva possível, com intuito de descrever os fenômenos estudados de maneira clara, direta, não deixando nenhum tipo de dúvidas sobre o que de descreve.

Por isso quando dizemos que um corpo se movimenta é preciso saber se suas dimensões interferem ou não no estudo que se está desenvolvendo. Dizer que o corpo é grande ou pequeno é muito vago: grande em relação a quê? Pequeno em relação a quê?

Portanto, quando nos referimos a um ponto material estamos dizendo a respeito de um corpo cujas dimensões, ou seja, seu tamanho é muito pequeno em relação às demais dimensões envolvidas no fenômeno estudado. Por exemplo, considere as seguintes situações descritas a seguir:

1 – Carros parados em um estacionamento.



Fonte: www.thesys.blog.uol.com.br

Figura 4 – Estacionamento de carros

Note que o tamanho dos carros é praticamente do tamanho das vagas disponíveis para se estacionar o automóvel. Nesse caso, como as dimensões do carro interferem no fenômeno não podemos considerá-lo pequeno. Portanto ele não pode ser descrito como um ponto material, mas como um corpo extenso.

2 – Carro numa longa autoestrada.



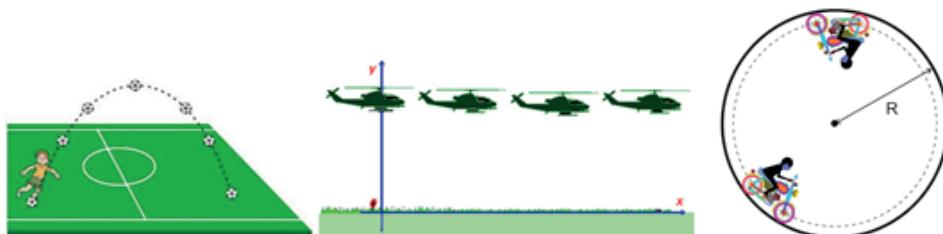
Fonte: <http://www.estadao.com.br/>

Figura 5 – Carros se locomovendo num longa autoestrada: parecem pontos

Nesse caso, perceba que o carro tem um tamanho muito pequeno em relação ao comprimento total da estrada. Neste caso, podemos considerá-lo um ponto material.

4.3 TRAJETÓRIA

Observe os seguintes pontos materiais em movimento:



Fonte: <http://www.estudopratico.com.br> - <http://sophiacodato.wix.com/> - www.osfundamentosdafisica.blogspot.com.br

Figura 6 – Pontos materiais em movimento

Você deve ter percebido que nas situações destacadas acima os pontos materiais se movimentam percorrendo um caminho que forma uma linha geométrica de diferentes formatos. O formato geométrico do caminho seguido pelo ponto material em movimento é chamado de trajetória do movimento.

4.4 SENTIDO DO MOVIMENTO

Ao percorrer um determinado caminho um ponto material pode ter um sentido no qual ele se afasta ou se aproxima do “marco zero” do referencial adotado. Quando ele se afasta do “marco zero” do referencial convencionou-se dizer que o sentido é positivo. Contudo, ao contrário, quando o ponto material se aproxima do “marco zero” do referencial temos um sentido negativo.

Considere, por exemplo, um carro em viagem na via Dutra (estrada brasileira que une o Rio de Janeiro à São Paulo).





Figura 7 – Sentidos do movimento de um automóvel

Um movimento positivo, ou seja, que durante o passar do tempo se afasta do "marco zero" do referencial é chamado de movimento progressivo.

Um movimento negativo, ou seja, que durante o passar do tempo se aproxima do "marco zero" do referencial é chamado se retrógrado.

4.5 POSIÇÃO DE UM PONTO MATERIAL AO DURANTE O MOVIMENTO

Você já sabe que ao longo do movimento um ponto material descreve uma linha que tem uma forma geométrica específica que denominamos trajetória. Essa linha é formada por uma sucessão de pontos. Cada ponto desses é chamado de posição do corpo ao longo do movimento.

Portanto, em cada instante de tempo, durante o movimento, o corpo ocupa diferentes posições. No instante de tempo igual a zero a posição ocupada pelo ponto material é denominado posição inicial.

Se representarmos os instantes de tempo pela letra t e a posição do ponto material do corpo pela letra X , temos que:

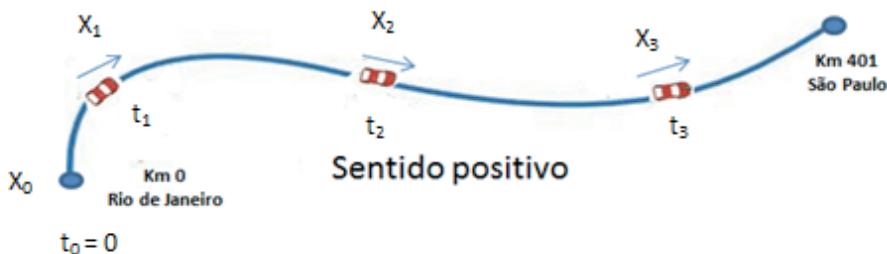


Figura 8 – Diferentes posições (X) ocupadas pelo móvel em diferentes instantes (t)

É importante notar que a posição inicial não é necessariamente igual a zero ($X=0$), mas a posição a partir do qual passamos a cronometrar o movimento, ou seja, quando $t_0 = 0$.

4.6 DESLOCAMENTO E DISTÂNCIA PERCORRIDADA

Duas grandezas importantes que precisam ser conhecidas para que você consiga descrever um movimento são o deslocamento e a distância percorrida.

Para você entender bem o significado dessas grandezas imagine a seguinte situação:

Admita um ponto material que sai da posição A (a 2 metros do marco zero do referencial), vai até a posição B (a 8 metros do marco zero do referencial) e, em seguida, volta para a posição C (a 5 metros do marco zero do referencial), como indica o esquema representado a seguir:

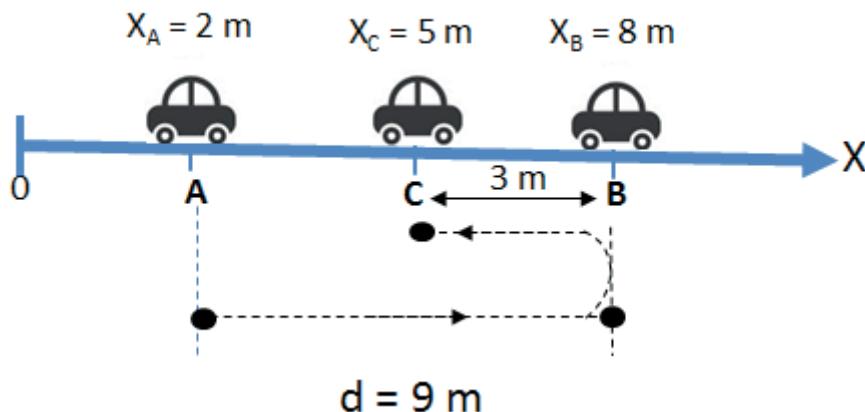


Figura 9 – Distância percorrida (d) do ponto material de A para B e de B para C

O ponto material ao partir de A para B tem um deslocamento de 6 metros (sentido positivo), mas como retorna 3 metros (sentido negativo), na verdade tem um deslocamento igual a 3 metros. Portanto, pode-se dizer que o deslocamento de um corpo, que representaremos por Δx , é igual posição final menos a posição inicial. Ou seja:

$$\Delta x = x - x_0$$

No exemplo temos:

$$\Delta x = x - x_0$$

Posição final: $x = 8\text{m}$

Posição inicial: $X_0 = 2\text{m}$

$$\Delta x = 8 - 2$$

$$\Delta x = 6 \text{ m}$$

A distância percorrida, que representaremos pela letra d, é o quanto de fato o ponto material percorreu, sem considerar o sentido do movimento. No caso do exemplo, o ponto material percorreu de A até B 6 metros e de B até C 3 metros, então no total percorreu uma distância de 9 metros. No exemplo temos:

$$d = d_{A \text{ até } B} + d_{B \text{ até } C}$$

$$d = 6 \text{ m} + 3 \text{ m}$$

$$d = 9 \text{ m}$$

O deslocamento é uma grandeza vetorial. Dessa forma, para ficar completamente definido é necessário conhecer módulo, direção e sentido. No estudo do movimento de trajetórias retilíneas a direção é sempre a mesma, não se altera, portanto, só consideramos o módulo e o sentido.

4.7 VELOCIDADE MÉDIA E VELOCIDADE INSTANTÂNEA

Outra característica importante do movimento está relacionado a ideia de rapidez, não é verdade? Quando pensamos em um ponto material em movimento é natural perguntarmos se ele se move rápido ou devagar. A grandeza que mede a rapidez do corpo é a velocidade.

O conceito de velocidade está relacionado com o deslocamento do corpo e com o tempo que ele gasta nesse percurso. Assim, por definição chama-se velocidade média a razão entre o deslocamento e o intervalo de tempo gasto para percorrê-lo.

A partir dessa definição imagine um automóvel que se movimenta numa estrada, num deslocamento ΔX durante um intervalo de tempo Δt . Matematicamente, podemos definir velocidade da seguinte forma:

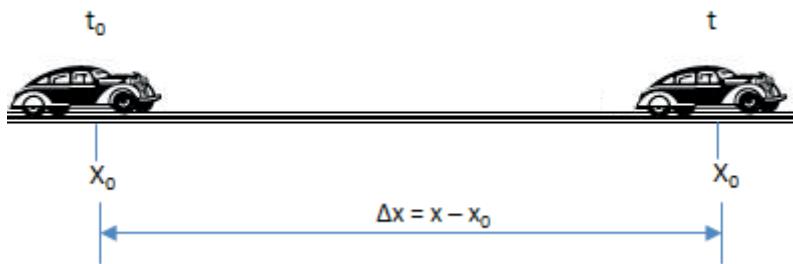


Figura 10 – definição de velocidade média

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x - x_0}{t - t_0}$$

Porém, isso não significa que o automóvel esteve sempre com essa velocidade. Pode ser que em algum instante ele pode ter aumentado a velocidade, diminuído, ou até mesmo parado por algum tempo.

A velocidade média, portanto, significa a média de velocidade do automóvel durante todo o percurso, enquanto que a velocidade instantânea é aquela que o móvel está num determinado instante de seu movimento.

A velocidade instantânea calcula-se da mesma forma que a velocidade média, porém, num intervalo de tempo menor, dando-nos uma ideia da velocidade do móvel num determinado instante. Nesse caso fazemos Δt tender a zero.

OBS.: É importante destacar que a velocidade é uma grandeza vetorial, sendo necessário, portanto, a definição de módulo, direção e sentido. Contudo, para movimentos de trajetória retilínea, a direção não se altera.

Como o deslocamento é também uma grandeza vetorial, podendo ser positivo ou negativo a velocidade também pode ser positiva ou negativa, dependendo do sentido do movimento.

4.7.1 A UNIDADE DE VELOCIDADE

Pela definição da velocidade média temos a razão de unidades da grandeza comprimento pela grandeza tempo. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a unidade de comprimento é o metro e a unidade de tempo é o segundo. Portanto, a unidade de velocidade no SI é dada por:

$$[V] = \frac{\text{metro}}{\text{segundo}} = \frac{m}{s}$$

Porém, existem unidades convencionais muito utilizadas. No Brasil é co-

$$\frac{\text{quilometro}}{\text{hora}} = \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

mmum a unidade

Uma regra prática para transformar unidades é a seguinte:

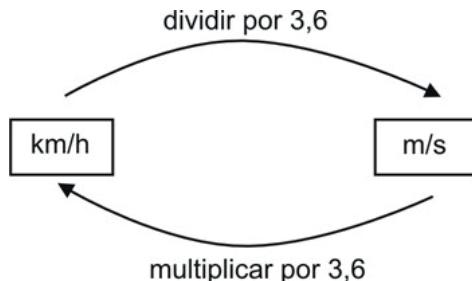


Figura 11 – Regra prática para transformar unidades de velocidade

4.8 ACELERAÇÃO MÉDIA E ACELERAÇÃO INSTANTÂNEA

A aceleração é outro conceito importante no estudo do movimento. Aliás, quando avaliamos o desempenho do motor de um automóvel, por exemplo, não verificamos até que velocidade final ele pode atingir, mas sim o tempo ele gasta para variar sua velocidade.

Em Física, a aceleração média é a razão entre a variação da velocidade e o tempo gasto para variá-la. Matematicamente podemos escrever:

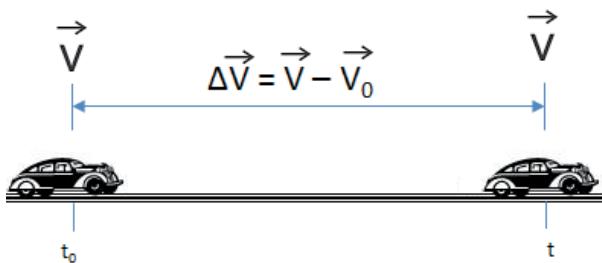


Figura 12 – Definição de aceleração

$$a_m = \frac{\text{variação da velocidade}}{\text{variação do tempo}} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V - V_0}{t - t_0}$$

Da mesma forma que a velocidade, a aceleração pode variar, dessa forma, quando temos intervalos de tempo bem pequenos a equação acima serve para calcular a aceleração instantânea.

Como a aceleração é uma grandeza vetorial ela se caracteriza pela definição de módulo, direção e sentido. Para movimentos retilíneos, a direção não se altera e, nesse caso, só consideramos o módulo e o sentido. Dessa forma, a aceleração pode ser positiva, se a velocidade aumenta ou, negativa, se a velocidade diminui.

4.8.1 A UNIDADE DE ACELERAÇÃO

Pela definição da aceleração média, temos a razão de unidades da grandeza velocidade pela grandeza tempo. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a unidade de velocidade é o metro por segundo. Portanto, a unidade de aceleração no SI é dada por:

$$[a] = \frac{\frac{m}{s}}{s} = \frac{m}{s^2}$$

5 MOVIMENTOS RETILÍNEOS

Dentre os movimentos retilíneos destacam-se dois: o Movimento Retilíneo Uniforme (MRU) e o Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV).

5.1 MOVIMENTO RETILÍNEO UNIFORME (MRU)

O MRU é o movimento cuja trajetória é uma reta e a velocidade é constante, ou seja, não se altera. Nesse caso, a velocidade média é igual a velocidade em cada instante do movimento.

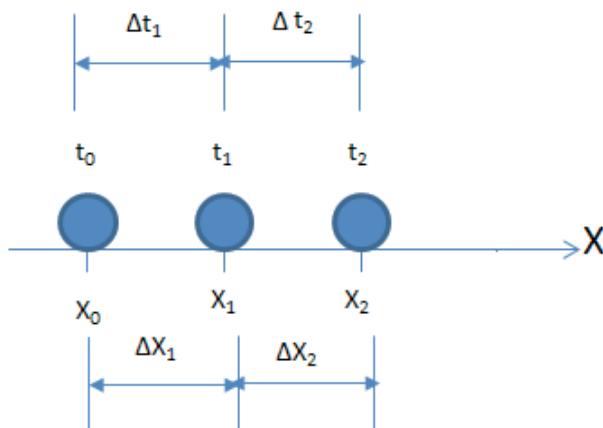


Figura 1 – Representação de um movimento retilíneo uniforme (MRU)

Nesse caso $\Delta x_1 = \Delta x_2$ e $\Delta t_1 = \Delta t_2$. Graficamente podemos representar as diferentes posições ocupadas pelo ponto material ao longo do tempo (gráfico: X versus t). Da seguinte forma:

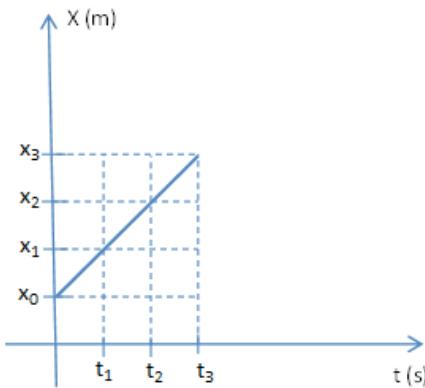


Figura 2 – Gráfico da posição versus o tempo de um ponto material em movimento retilíneo uniforme (MRU)

A função matemática que descreve esse gráfico é do primeiro grau e pode ser escrita como:

$$x = x_0 + vt$$

Onde x_0 é posição inicial e v a velocidade constante do ponto material.

Essa função é denominada de função horária da posição de um ponto material em MRU.

Como no MRU a velocidade é constante, o gráfico da velocidade em função do tempo pode ser representado da seguinte forma:

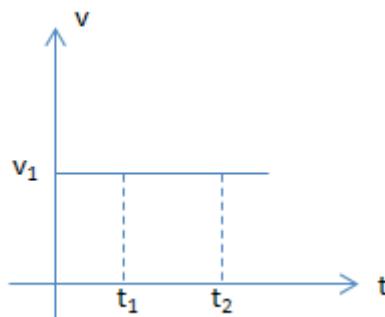


Figura 3 – Gráfico da velocidade *versus* o tempo de um ponto material em movimento retilíneo uniforme (MRU)

Calculando a área da figura formada pela curva sob o gráfico da velocidade *versus* o tempo de uma partícula em movimento, entre os instantes t_1 e t_2 , é possível determinar o espaço percorrido pelo ponto material neste intervalo de tempo:

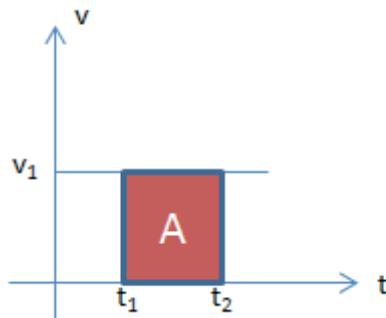


Figura 4 – Determinação do espaço percorrido entre os instantes t_1 e t_2 de um ponto material em MRU a partir do gráfico da velocidade *versus* o tempo

$$A_{\text{gráfico}} = \text{base} \times \text{altura}$$

$$A_{\text{gráfico}} = V \Delta t = \Delta x$$

Portanto:

$$A_{\text{gráfico vxt}} = \Delta x$$

5.2 MOVIMENTO RETILÍNEO UNIFORMEMENTE VARIADO (MRUV)

No Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV) a trajetória é retilínea, mas a velocidade varia de maneira uniforme, ou seja, há uma aceleração constante.

Nesse caso, imagine um automóvel em M.R.U.V, que parte de uma posição inicial X_0 , com uma velocidade inicial V_0 e, ao longo do intervalo de tempo Δt varia sua velocidade para V . Assim, para um instante $t_0 = 0$ ele tem velocidade V_0 e, para um instante t , ele tem velocidade V .

Construindo o gráfico da velocidade versus o tempo para o M.R.U.V temos:

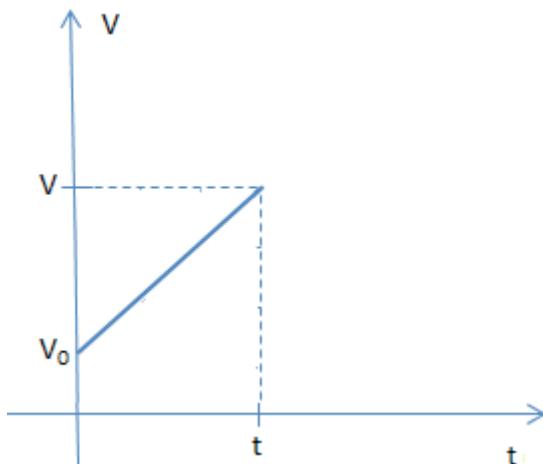


Figura 5 – Gráfico da velocidade *versus* o tempo de um ponto material em M.R.U.V

Esse gráfico, como você já sabe é o de uma função linear de primeiro grau e, portanto, podemos escrever a seguinte função, denominada função horária da velocidade de um ponto material em M.RUV:

$$V = V_0 + at$$

Onde v_0 é a velocidade inicial e a a aceleração do ponto material.

5.2.1 MOVIMENTO RETILÍNEO UNIFORMEMENTE ACCELERADO E MOVIMENTO RETILÍNEO UNIFORMEMENTE RETARDADO

A velocidade e a aceleração são grandezas vetoriais e, portanto só estão bem caracterizadas quando são definidos o módulo, a direção e o sentido. Porém, por estarmos estudando movimentos de trajetória retilínea, a direção não muda. Contudo,

é importante ficarmos atentos não só ao módulo dessas grandezas, mas também ao sentido delas.

Considerando o sentido da velocidade e da aceleração no MRUV, podemos classificá-lo em: acelerado ou retardado.

No MRUV acelerado a velocidade e a aceleração têm o mesmo sentido, portanto, precisam ter o mesmo sinal, podendo ser ambas positivas ou negativas.

No MRUV retardado a velocidade e a aceleração têm sentidos contrários, portanto, precisam ter sinais contrários: uma negativa e outra positiva.

Agora, vamos fazer uma análise do MRUV, a partir do gráfico V versus o tempo:

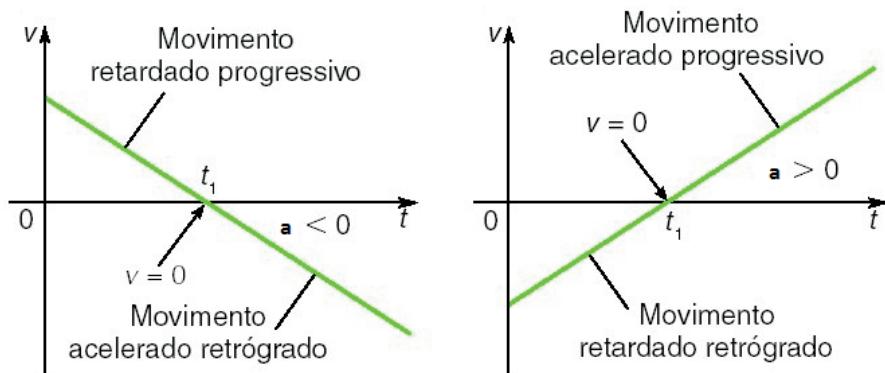


Figura 6 – Gráficos da velocidade *versus* o tempo de pontos materiais em MRUVA e MRUVR

5.2.2 FUNÇÃO HORÁRIA DA POSIÇÃO DO MRUV

Já sabemos que a área da curva sob gráfico da velocidade versus o tempo de um ponto material em movimento é igual ao espaço que ele percorreu.

Nesse caso, podemos calcular:

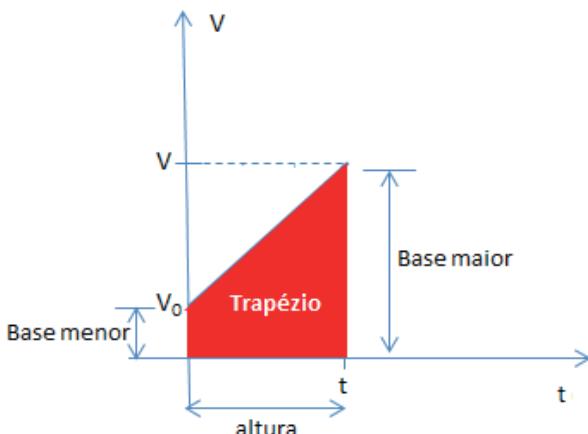


Figura 7 – Área sob a curva dos gráficos da velocidade *versus* o tempo de um ponto material em MRUV

A figura sob o gráfico V versus t de um ponto material em MRUV é um trapézio. A área de um trapézio é dada expressão:

$$A_{\text{trapézio}} = \frac{\text{base maior} + \text{base menor}}{2} \cdot \text{altura}$$

Como a área da figura sob o gráfico V versus t de um ponto material em MRUV é igual ao deslocamento do móvel, então podemos escrever:

$$\Delta x = \frac{v + v_0}{2} \cdot t$$

Substituindo uma equação na outra, temos que:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

Essa é a função horária da posição de um ponto material em MRUV.

Perceba que é uma função típica de segundo grau, pois a posição X varia com o quadrado tempo. Portanto, o gráfico X versus tempo para um ponto material em MRUV é uma parábola, como pode se ver na figura a seguir:

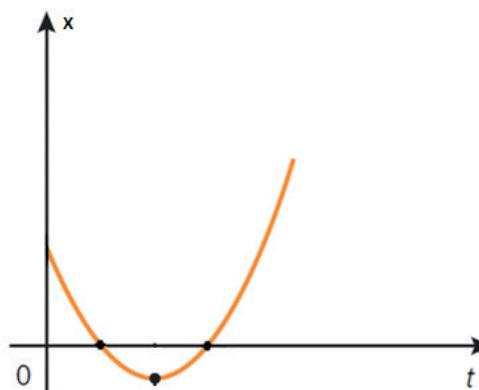


Figura 8 – Gráfico da posição *versus* tempo de um ponto material em MRUV

Agora, vamos fazer uma análise do MRUV, a partir do gráfico X versus o tempo

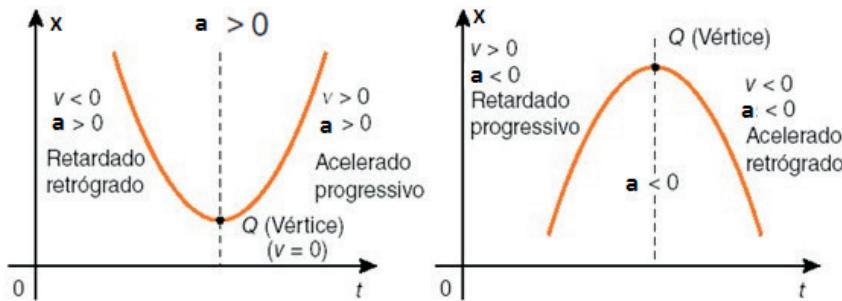


Figura 9 - Análise do gráfico da posição versus o tempo de um ponto material em MRUV

5.2.3 EQUAÇÃO DO TORRICELLI

A equação de Torricelli é muito útil, pois permite que você resolva problemas nos quais não se informa sobre o tempo de duração do movimento.

Para obtê-la, basta que você isole o tempo t e substitua na equação. Dessa forma teremos:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

6 QUEDA LIVRE

Dizemos que um ponto material está em queda livre quando a única força que atua sobre ele é a força da gravidade, ou seja, a força que o planeta exerce sobre ele. Como os gases que formam a nossa atmosfera opõem-se resistência à queda dos corpos, pode-se dizer que o movimento de queda livre só existe no vácuo.



Fonte: www.docplayer.com.br

Figura 1- Paraquedista caindo sob ação da força peso e a força de resistência do ar

Contudo, se tivermos um ponto material (ou seja, um corpo de dimensões bem reduzidas) caindo de uma altura não muito grande, pode-se desprezar a influência do atrito do ar e considerar o ponto material em queda livre.

O movimento de queda livre é um Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV), cuja aceleração é a aceleração da gravidade representada pela letra g.

O valor de g varia de um local para outro dependendo de variações na latitude, distribuição de massas do planeta e, fundamentalmente, da altitude em relação ao centro do planeta: quanto mais baixo (próximo do centro do planeta) g tem módulo maior. Porém, quanto mais alto (distante do centro do planeta) g tem módulo menor.

Para fins didáticos, desprezando os efeitos de variações na latitude e distribuição de massas da Terra e considerando ainda mínima a variação de g para altitudes próximas da superfície terrestre admite-se que o valor da aceleração da gravidade na Terra valha $g=9,8 \text{ m/s}^2$. Algumas vezes esse valor é arredondado para 10 m/s^2 .

6.1 PONTO MATERIAL ABANDONADO DE UMA ALTURA h SOBRE A SUPERFÍCIE DA TERRA

Considerando que um ponto material é abandonado de uma altura h em relação à superfície da Terra, caindo em queda livre, temos:

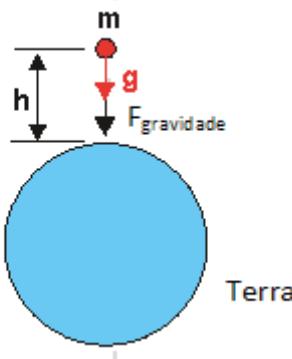


Figura 2 - Ponto material em queda livre sobre a superfície da Terra

Quando abandonamos um corpo de altura h sobre a superfície terrestre, temos um MRUVA, na qual a velocidade inicial é nula, ou seja, $V_0 = 0$, então a função horária da posição pode ser escrita:

$$\Delta h = \frac{1}{2}gt^2$$

A função horária da velocidade pode ser escrita:

$$V = gt$$

A equação de Torricelli pode ser escrita:

$$V = \pm\sqrt{2g\Delta h}$$

Porém, se ao invés de abandonado o ponto material for lançado, devemos admitir uma velocidade inicial. Como a velocidade é uma grandeza vetorial é preciso considerar quatro possibilidades: Lançamento vertical para baixo, Lançamento vertical para cima, Lançamento oblíquo e Lançamento horizontal.

6.2 LANÇAMENTO VERTICAL PARA BAIXO

Quando temos um lançamento vertical para baixo, a velocidade inicial tem a mesma direção e sentido que a aceleração da gravidade. Por isso, dizemos

que o ponto material lançado adquire um Movimento Retilíneo Uniformemente Acelerado. Então podemos escrever:

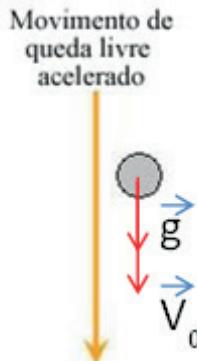


Figura 3 - Ponto material lançado para baixo sem resistência do ar

Nesse caso as equações a serem utilizadas são as seguintes:

$$\Delta h = V_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

$$V = V_0 + gt$$

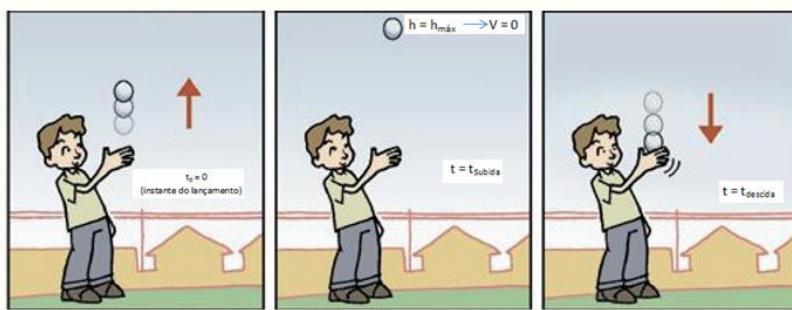
$$V = \pm \sqrt{V_0^2 + 2g\Delta h}$$

6.3 LANÇAMENTO VERTICAL PARA CIMA

Quando um ponto material é lançado verticalmente para cima ele sobe até uma altura máxima, para e depois cai.

Note que durante a subida, o sentido da velocidade é oposto ao sentido da aceleração da gravidade, portanto, o movimento é retardado.

À medida que sobe o ponto material vai diminuindo sua velocidade até que, ao atingir a altura máxima, ela torna-se nula, ou seja, quando $h = h_{\text{máx}}$, então $V = 0$. Para determinarmos a altura máxima atingida fazemos:



Fonte: Livro Didático PÚBLICO/SEED

Figura 4 - Ponto material lançado para cima sem resistência do ar: ele sobe, para e depois cai

$$V^2 = V_0^2 - 2g\Delta h$$

$$0^2 = v_0^2 - 2gh_{\max}$$

$$h_{\max} = \frac{V_0^2}{2g}$$

O tempo gasto para a subida, desde o ponto de lançamento até o ponto mais alto da trajetória pode ser calculado da seguinte maneira:

$$V = V_0 - gt_{\text{subida}}$$

Lembre-se que no ponto mais alto da trajetória a velocidade final é igual a zero, então

$$0 = V_0 - gt_{\text{subida}}$$

$$t_{\text{subida}} = \frac{V_0}{g}$$

A partir desse instante o ponto material começa a cair.

Perceba o tempo de subida é igual ao tempo de descida, neste caso, o tempo total de movimento será igual:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{subida}} + t_{\text{descida}}$$

Como $t_{\text{subida}} = t_{\text{descida}}$, temos que o tempo total é igual ao dobro do tempo de subida:

$$t_{\text{total}} = 2 \frac{V_0}{g}$$

7 LANÇAMENTOS HORIZONTAIS E OBLÍQUOS SEM RESISTÊNCIA DO AR

Em nosso cotidiano, observamos não apenas movimentos de queda ou de lançamentos de corpos na vertical, mas eles também podem ocorrer em diferentes direções. Por isso, a partir de agora, vamos começar a estudar os movimentos oblíquos (oblíquo é uma palavra cujo sentido aqui quer dizer anguloso, ou seja, que faz ângulo inclinado em relação a uma referência), ou seja, cujo arremesso faz ângulo com a horizontal diferente de 90°.

Continuamos a desconsiderar a resistência do ar, por isso, vamos partir da premissa de que o movimento acontece no vácuo.

Esse tipo de fenômeno foi estudado no século XVII por Galileu Galilei, que, para explicá-lo, propôs a teoria da simultaneidade do movimento composto.

“Se um corpo apresenta um movimento composto, cada um dos movimentos componentes se realiza como se os demais não existissem e no mesmo intervalo de tempo” (Galileu Galilei).

7.1 LANÇAMENTOS HORIZONTAIS

Para entendermos melhor essa interpretação de Galileu, pensemos, primeiramente, no caso de um lançamento horizontal sob ação da gravidade e no vácuo, ou seja, desconsiderando a ação da resistência do ar. Para tanto, imagine um ponto material, no vácuo, sendo lançado com velocidade horizontal, \vec{v}_0 , a uma certa altura H , em relação ao solo.

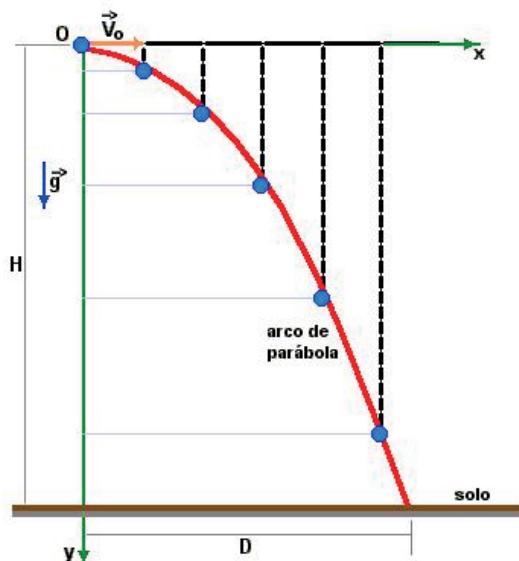


Figura 1 - Ponto material lançado horizontalmente sob ação da gravidade sem resistência do ar

É possível notar que esse movimento é composto por dois movimentos componentes: um horizontal e outro vertical. Perceba que o ponto material, além de deslocar-se na vertical, caindo de uma altura H, também, simultaneamente, percorre uma distância D na horizontal.

Segundo o Princípio da Simultaneidade do Movimento composto, podemos dividi-los em dois e estudá-los separadamente.

Na horizontal, o ponto material descreve um movimento retilíneo uniforme, um MRU, cuja velocidade constante é \vec{v}_0 , e, na vertical, um movimento retilíneo uniformemente variado, um MRUV cuja aceleração constante é igual a \vec{g} .

Assim, na horizontal, podemos escrever:

$$D = v_0 t$$

Na vertical:

$$H = \frac{1}{2} g t_q^2$$

É importante destacar que o tempo t_q , tempo de queda, na segunda equação, e o tempo t, na equação primeira, é o mesmo, pois os dois movimentos, horizontal e vertical, ocorrem simultaneamente. Além disso, note que, na função horária, desprezamos o termo $v_0 t$, porque em y, ou seja, a velocidade inicial para baixo, na vertical, é nula. Portanto, v_0 só deve ser considerado na horizontal.

Nesse caso, é interessante, para resolução de problemas, conhecer as equações relacionadas aos movimentos componentes (chamadas de equações paramétricas) independentemente da grandeza tempo. Assim, da equação I, podemos escrever:

$$t = t_q = \frac{D}{v_0}$$

Se substituirmos a terceira equação na segunda equação, temos:

$$H = \frac{1}{2} g \left(\frac{D}{v_0} \right)^2$$

Então:

$$H = \frac{1}{2} g \frac{D^2}{V_0^2}$$

Para obter uma equação independente do tempo, t, temos:

$$H = \frac{1}{2} g t_q^2$$

$$t_q = t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$D = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Para finalizarmos o estudo do lançamento horizontal, é importante destacar que, como já frisamos, na direção horizontal, a velocidade do ponto material é sempre \vec{v}_0 . Porém, em relação ao movimento vertical, no início, o ponto material tem velocidade inicial igual a zero, mas, por causa da ação da gravidade, o módulo da velocidade aumenta com o passar do tempo, apesar de sua direção e sentido se manterem constantes (na vertical e dirigida para baixo).

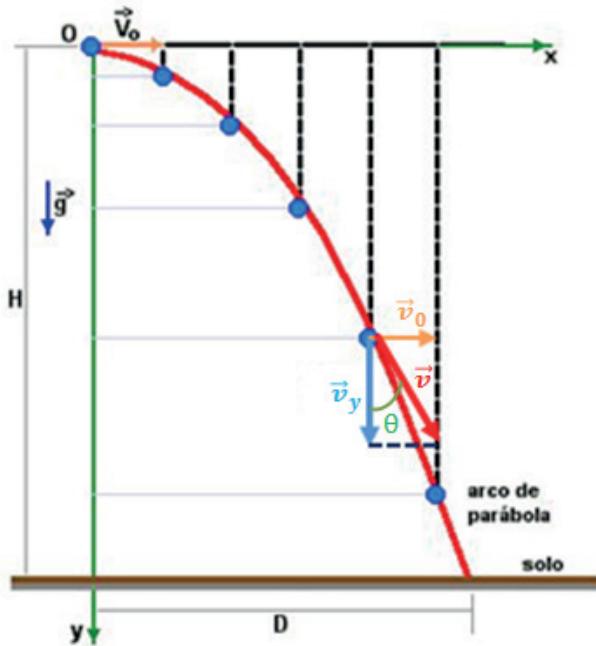


Figura 2 – Decomposição do vetor velocidade de um ponto material lançado horizontalmente sob ação da gravidade sem resistência do ar

Na figura 2, mostramos que existe uma velocidade \vec{v} tangente à curva da trajetória do ponto material com duas componentes, $\vec{v}_x = \vec{v}_0$ e \vec{v}_y , onde \vec{v}_x é constante durante todo o movimento e \vec{v}_y varia seu módulo desde o valor zero.

$$v_y = gt$$

E

$$v = \pm \sqrt{v_0^2 + v_y^2}$$

Como v_y muda em função do tempo, v também muda em função do tempo:

$$v = \pm \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}$$

Contudo, observe que não é só o módulo de v que muda com o tempo: sua direção e sentido mudam também, ao longo da trajetória.

A direção θ de v pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$\tan \theta = \frac{v_x}{v_y}$$

A direção também muda com o tempo:

$$\tan \theta = \frac{v_0}{gt}$$

7.2 LANÇAMENTOS OBLÍQUOS

Agora, vamos considerar um ponto material que é lançado no vácuo com uma velocidade inicial \vec{v}_0 , cuja direção faz um ângulo θ com a horizontal.

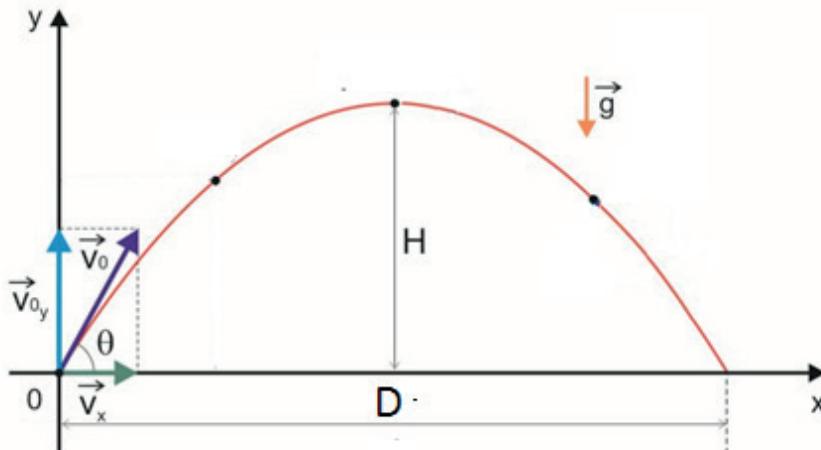


Figura 3 – Ponto material lançado obliquamente sob ação da gravidade sem resistência do ar

Note que \vec{v}_0 é tangente à trajetória parabólica do ponto material e que, adotando-se o Princípio da simultaneidade e independência dos movimentos, proposto por Galileu, temos duas componentes para \vec{v}_0 , uma horizontal \vec{v}_{0x} e outra vertical \vec{v}_{0y} .

Utilizando os conhecimentos adquiridos sobre a decomposição de vetores, no sistema cartesiano, podemos escrever que:

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta$$

$$v_{0y} = v_0 \sin\theta$$

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2}$$

Na vertical, o movimento é um MRUV com aceleração constante igual a \vec{g} ; assim, podemos descrever o movimento a partir da seguinte forma:

$$H = v_0 t \sin\theta - \frac{1}{2} g t^2$$

$$v_y = v_0 \sin\theta - gt$$

O tempo total do movimento envolve um tempo de subida t_s e um tempo de descida t_d . Como $t_s = t_d$, então o tempo total $t_t = t_s + t_d$ ou $t_t = 2t_s$

Observe que tempo de movimento é igual ao de subida, quando o corpo atinge a altura máxima H, a partir da qual o ponto material começa a descer, ou seja, $t = t_s$ quando $h = H$. Veja, na figura a seguir:

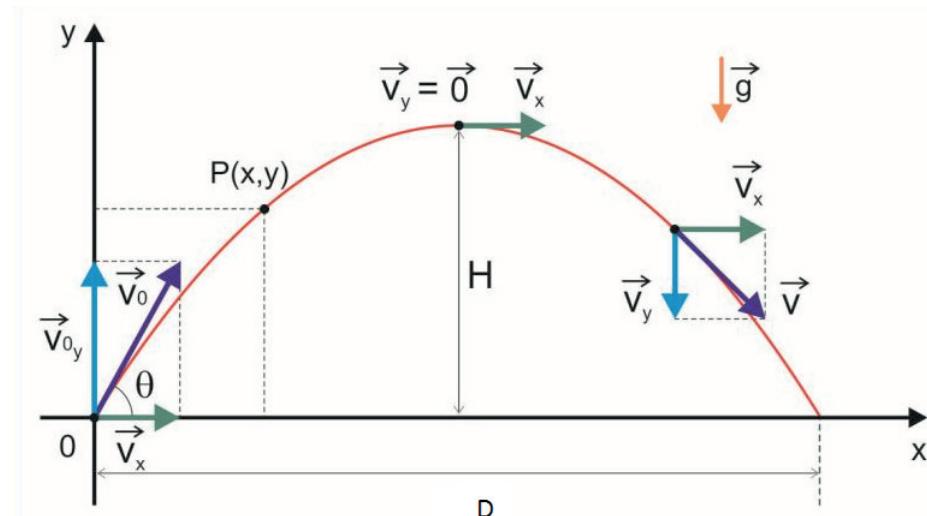


Figura 4 – Representação do vetor velocidade de um ponto material lançado horizontalmente sob ação da gravidade sem resistência do ar

Note que, quando $\textcolor{brown}{h} = H$ a velocidade $\vec{v}_y = \mathbf{0}$, ou seja, o corpo para de subir, a velocidade na vertical se anula. Então, temos:

$$\textcolor{brown}{t}_s = \frac{\textcolor{blue}{v}_0 \sin \theta}{g}$$

Para obtermos a expressão da altura máxima H , atingida, basta substituir e teremos:

$$H = \frac{\textcolor{blue}{v}_0^2 \sin^2 \theta}{2g}$$

Na horizontal, o movimento é um MRU com velocidade constante igual a \vec{v}_{0x} , portanto:

$$D = \textcolor{blue}{v}_0 \cos \theta t$$

Contudo, o tempo t é igual ao tempo total $\textcolor{brown}{t}_t = 2\textcolor{brown}{t}_s$. Logo, temos:

Ou seja:

$$D = \frac{2 \textcolor{blue}{v}_0 \cos \theta \sin \theta}{g}$$

O módulo da velocidade \vec{v} do ponto material em qualquer ponto da trajetória é dado por:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

8 MOVIMENTOS CIRCULARES

O movimento circular é aquele no qual um ponto material descreve uma trajetória circular. Esse tipo de movimento é muito comum em nosso cotidiano: movimento das rodas de uma moto, de um automóvel contornando uma rotatória, das pás de um ventilador etc.



Fonte: www. <https://pixabay.com/pt/> - <http://rede.novaescoladubr.org.br/> - <http://www.gettyimages.pt/>

Figura 1 – Exemplos de movimentos circulares

Em nossos estudos, abordaremos o Movimento Circular Uniforme (MCU) e o Movimento Circular Uniformemente Variado (MCUV).

8.1 MOVIMENTO CIRCULAR UNIFORME (MCU)

Dizemos que um ponto material realiza um movimento circular uniforme (MCU), quando, em relação a um referencial, sua trajetória for uma circunferência e sua velocidade apresentar módulo constante.

Na figura a seguir, representamos um ponto material em MCU. Note a trajetória circular e como o módulo do vetor velocidade é constante.

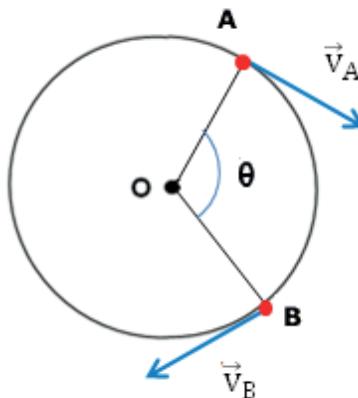


Figura 2 – Ponto material em movimento circular uniforme $V_A = V_B$

Porém, perceba que, apesar do módulo constante, a direção e o sentido da velocidade se alteram ao longo do tempo.

Mas o que faz isso acontecer? O que mantém o corpo na trajetória circular?

8.1.1 A ACELERAÇÃO NO MCU

Já estudamos que a grandeza física a qual indica a medida da variação da velocidade, num determinado intervalo de tempo, é a aceleração. De fato, no MCU, existe uma aceleração, a despeito de o módulo da velocidade ser constante, porque a aceleração, nesse caso, indica a medida de variação apenas da direção e sentido da velocidade, devido à existência de uma força dirigida ao centro da trajetória circular, que não deixa o corpo escapar pela tangente. Observe que, no exemplo a seguir, a força radial (na direção do raio), denominada força centrípeta, é responsável por não deixar o corpo escapar pela tangente. No caso do exemplo, quem realiza essa força é a mão que exerce uma tração no fio que prende o ponto material à trajetória circular.

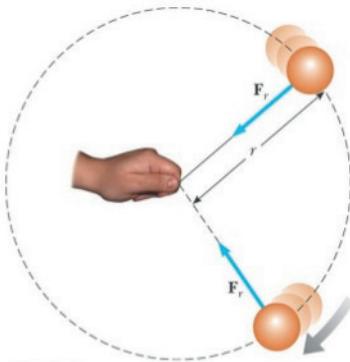


Figura 3 – Força radial dirigida para o centro da trajetória

Para entender melhor isso, imagine a situação a seguir: considere um ponto material girando em torno de um ponto O, numa trajetória circular de raio r , com as velocidades \vec{v}_A e \vec{v}_B iguais em módulo, mas diferentes em direção e sentido.

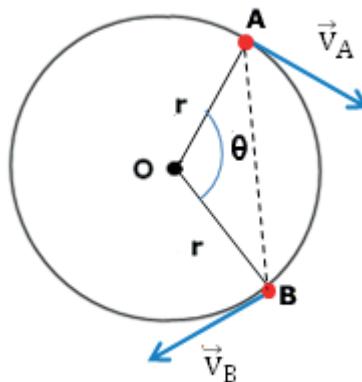


Figura 4 – Variação da direção e do sentido do vetor velocidade linear

Utilizando a regra do polígono para determinação do vetor resultante entre $-\vec{v}_A$ e \vec{v}_B , temos:

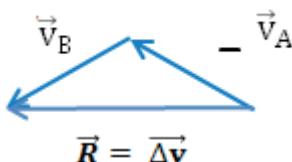


Figura 5 – Representação vetorial da resultante $-\vec{v}_A + \vec{v}_B$

Note que o vetor resultante $\vec{\Delta v}$ está dirigido para o centro da trajetória. Como a aceleração pode ser definida como sendo a razão entre a variação da velocidade e o intervalo de tempo, ou seja,

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t}$$

Podemos definir essa aceleração, \vec{a}_{cp} , que só indica a variação da direção e sentido da velocidade e que está dirigida para o centro da trajetória circular, como aceleração centrípeta.

Por meio do uso de semelhança de triângulos, é possível mostrar que o módulo da aceleração centrípeta é igual a:

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r} \quad (I)$$

8.1.2 FREQUÊNCIA E PERÍODO NO MOVIMENTO CIRCULAR

Nos movimentos circulares, temos o que chamamos de movimento periódico, ou seja, um movimento que se repete num determinado período de tempo.

Definimos, portanto, a grandeza período, a qual representaremos pela letra T, como sendo o tempo necessário para que o ponto material percorra uma volta completa em sua trajetória circular.

Por conseguinte, se um corpo, em movimento circular sai de um ponto A e retorna a ele, completando o ciclo, dizemos que o tempo gasto nesse percurso é igual ao período.

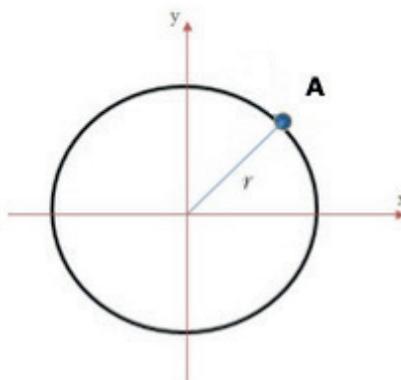


Figura 6 – Determinando frequência e período do movimento circular

A unidade de período no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o segundo (s).

Se observarmos um movimento circular uniforme por muito tempo, vemos que ele se repete várias vezes, dando várias voltas em torno do eixo de rotação. Nesse caso, definimos frequência, que representaremos pela letra f , como sendo a grandeza a qual mede o número de voltas que um ponto material deu, num determinado intervalo de tempo.

Observe, portanto, que frequência é o inverso do período, ou seja:

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

A unidade de frequência no SI é o s^{-1} ou o hertz (Hz). A unidade hertz indica quantas voltas, ou rotações, o ponto material realizou em torno de um eixo num determinado intervalo de tempo; por isso, em alguns problemas, é comum aparecer a indicação RPS, ou seja, Rotações por segundo.

Quando surgir num problema a indicação RPM, ou seja, Rotações por minuto, e você precisar fazer a conversão dessa unidade para hertz, divida o valor em RPM por 60 e o resultado será a frequência em Hz. A regra prática é dada no esquema a seguir:

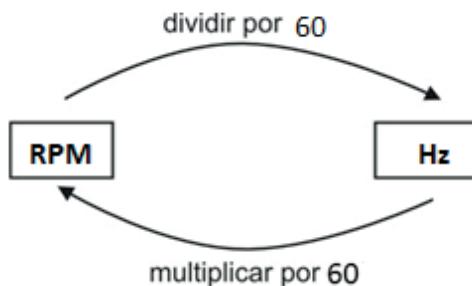


Figura 7 – Regra prática para transformar unidades de frequência

8.1.3 VELOCIDADE LINEAR E VELOCIDADE ANGULAR

Num movimento circular, podemos analisar o ritmo do movimento, tanto em função da distância linear percorrida por um ponto material, num determinado intervalo de tempo, como em função do ângulo que o ponto material descreve, na unidade de tempo. Por isso, podemos definir duas velocidades: a velocidade linear e a velocidade angular.

Para aprofundarmos essa questão, imagine três pontos materiais percorrendo trajetórias circulares em torno de um ponto O. Todos eles descrevem o mesmo ângulo θ , porém, percorrem distâncias Δx diferentes, como é mostrado na figura a seguir:

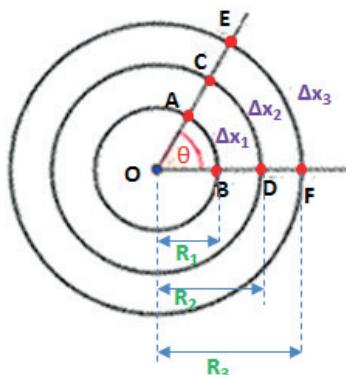


Figura 8 – Relação entre comprimento dos arcos e ângulo

Note que, para as três partículas, o ângulo é o mesmo, o que muda são os arcos Δx_1 , Δx_2 e Δx_3 e os raios R_1 , R_2 e R_3 .

Por definição, radiano (rad) é a medida do ângulo θ , determinado pela razão entre arco e raio dos pontos materiais. Observe que temos uma constante:

$$\theta = \frac{\Delta x_1}{R_1} = \frac{\Delta x_2}{R_2} = \frac{\Delta x_3}{R_3}$$

Isso nos permite generalizar a seguinte relação entre o deslocamento linear e o deslocamento angular:

$$\theta = \frac{\Delta x}{R} \rightarrow \Delta x = R\theta$$

Como velocidade é definida pela razão entre a distância percorrida e o intervalo de tempo gasto para percorrê-la, então:

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta \mathbf{x}}{\Delta t} \rightarrow \mathbf{v} = \frac{R\theta}{\Delta t}$$

Se preferirmos estudar o ritmo do movimento, analisando o ângulo descrito, podemos definir velocidade angular, $\vec{\omega}$, como sendo a razão entre o ângulo descrito e o intervalo de tempo gasto para descrevê-lo.

Logo:

$$\omega = \frac{\theta}{\Delta t}$$

A unidade da velocidade angular normalmente utilizada é o radiano por segundo (rad/s).

No caso de estudarmos uma volta completa, ou seja, imaginando que o ponto material descreva um ângulo igual a 2π rd, e lembrando que, para esse caso, o tempo é igual ao período T, podemos escrever:

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

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

como o período

$$\omega = 2\pi f$$

Veja que, das equações, podemos estabelecer uma relação entre velocidade angular e velocidade linear:

$$v = \frac{R\theta}{\Delta t} \text{ e como } \omega = \frac{\theta}{\Delta t}, \text{ então:}$$

$$v = \omega R$$

Perceba que essa equação demonstra que, enquanto a velocidade angular é constante para qualquer raio, a velocidade linear varia com o raio. Portanto, dois móveis, percorrendo distâncias lineares diferentes, podem ter o mesmo valor de velocidade angular, mas diferentes valores de velocidade linear.

8.1.4 FUNÇÃO HORÁRIA DO MOVIMENTO CIRCULAR UNIFORME (MCU)

Se fizermos uma analogia com o Movimento Retilíneo Uniforme, temos que, para MRU, a função horária é:

$$x = x_0 + vt$$

Como vimos que $\Delta x = R\theta$ e $v = \omega R$, então, para o MCU, podemos escrever:

$$\theta = \theta_0 + \omega t$$

8.2 MOVIMENTO CIRCULAR UNIFORMEMENTE VARIADO (MCUV)

Dizemos que um ponto material realiza um Movimento Circular Uniformemente Variado (MCUV), quando, em relação a um referencial, sua trajetória for uma circunferência e sua velocidade variar, tanto em módulo como em direção e em sentido.

Assim, além de uma aceleração centrípeta, há uma aceleração tangencial, a qual indica a variação do módulo da velocidade linear.

$$\mathbf{a}_t = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$

Nesse caso, temos, também, uma aceleração angular γ , cujo módulo é dado por:

$$\gamma = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

A unidade de aceleração angular normalmente utilizada é o radiano por segundo ao quadrado (rad/s^2).

Observe ainda que, se

$$\gamma = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

então:

$$\gamma = \frac{a_t}{R}$$

8.2.1 FUNÇÕES HORÁRIAS DO MCVU

Se fizermos uma analogia com o Movimento Retilíneo Uniformemente Variado, temos que, enquanto para o MRUV as funções horárias são:

a) da posição:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

b) da velocidade:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t$$

No MCVU, como $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{R}\theta$, $\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega}\mathbf{R}$ e $\gamma = \frac{a_t}{R}$, então para o MCVU, podemos escrever:

a) da posição:

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2$$

b) da velocidade:

$$\omega = \omega_0 + \gamma t$$

8.2.2 EQUAÇÃO DE TORRICELLI PARA O MCV

Podemos ainda escrever a equação de Torricelli para o MCV, ou seja, uma equação independente do tempo:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\gamma\Delta\theta \quad \omega^2 = \omega_0^2 + 2\gamma\Delta\theta$$

9 DINÂMICA

A dinâmica é a área de estudos da Física que estuda as causas que produzem e modificam o movimento. As três Leis de Newton são os pilares da dinâmica e, por isso, sua compreensão é fundamental para essa área de estudo.

9.1 PRIMEIRA LEI DE NEWTON OU LEI DA INÉRCIA

O que é mais difícil de parar: um caminhão com velocidade de 50 km/h ou uma bicicleta nessa mesma velocidade?

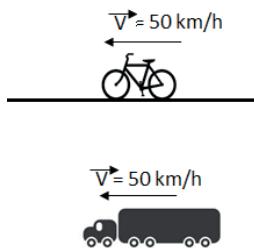


Figura 1 – Bicicleta e caminhão com a mesma velocidade

É claro que é o caminhão. Mas por que será? Se tanto o caminhão quanto a bicicleta têm a mesma velocidade?

É por causa da massa. Newton percebeu que a inércia, ou seja, uma propriedade que os corpos apresentam em resistir a quaisquer tentativas de variar seu vetor velocidade, é proporcional às suas massas.

Dessa forma, para fazermos um corpo que, inicialmente, está parado ($V=0$), entrar em movimento, precisamos vencer sua inércia. Quanto maior for a massa do corpo, maior sua inércia e, consequentemente, mais difícil será variar sua velocidade.

Em nossos estudos da cinemática, aprendemos que a grandeza vetorial a qual mede variações no vetor velocidade de um corpo é a aceleração; assim, imagine três corpos de massas m_1 , m_2 e m_3 , (sendo $m_1 > m_2 > m_3$) aos quais

se aplicam diferentes intensidades de forças, obtendo-se diferentes acelerações. Essa situação pode ser representada a partir do gráfico a seguir:

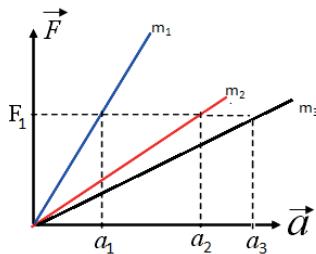


Figura 2 – Gráfico da força versus a aceleração

Observe que, para uma mesma força de intensidade igual a F_1 , o corpo de massa m_1 acelera menos que o corpo de massa m_2 , que, por sua vez, acelera menos que o corpo de massa m_3 . Isso quer dizer que variar a velocidade do corpo de massa m_1 é mais difícil que variar as velocidades dos corpos de massa m_2 e de m_3 . Isso acontece porque a inércia do corpo de massa m_1 é maior que a inércia dos corpos de massas m_2 e m_3 .

Por conseguinte, em sua primeira Lei, Newton afirma que todo corpo tende a se manter parado ou em MRU (vetor velocidade constante), se nenhuma força resultante for aplicada sobre ele.

9.2 SEGUNDA LEI DE NEWTON OU LEI DE CAUSA E EFEITO

Uma das concepções de Newton é a de que todo efeito tem uma causa. Assim, se um corpo tende a manter o vetor velocidade constante, qualquer alteração observada dessa grandeza, uma aceleração, é um efeito que tem por causa a aplicação de uma força.

Pelo gráfico \vec{F} versus \vec{a} , podemos notar que, para cada valor de massa, temos uma inclinação diferente para a reta obtida. Assim, a tangente do ângulo é igual à massa do corpo, de maneira que podemos escrever, matematicamente:

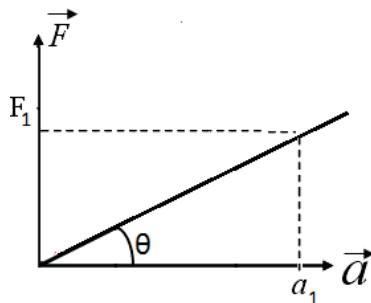


Figura 3 – A inclinação do gráfico da força versus a aceleração indica a medida de massa do corpo

$$\operatorname{tg} \theta = m = \frac{\text{cateto oposto}}{\text{cateto adjacente}} = \frac{F}{a}$$

$$\vec{F}_R = m\vec{a} \quad \vec{F}_R = m\vec{a} \quad (\text{I})$$

Consequentemente, a segunda Lei de Newton expressa a definição de força como sendo a grandeza vetorial que mede a interação estabelecida entre corpos e que pode ser calculada pelo produto da massa de um corpo pela aceleração por ele adquirida.

Em alguns problemas de dinâmica, é comum a utilização de nomes para força. Vejamos algumas dessas denominações:

a) **Tração:** A força de tração (\vec{T}) é aquela que surge atuando num corpo por meio de uma corda, um fio, um cabo etc.

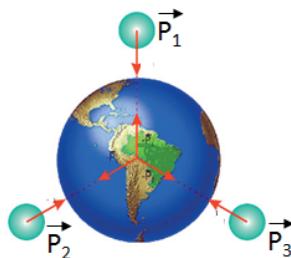


Figura 5 – Tração em fios

b) **Força -peso:** No próximo capítulo, trataremos sobre a teoria da Gravitação Universal. Lá veremos que a Terra, nosso planeta, nos atrai para o seu centro. Essa força de atração exercida pela Terra sobre os corpos em sua superfície é denominada força-peso ou simplesmente peso, tem direção vertical, sentido para baixo (para o centro da Terra) e pode ser calculada da seguinte forma:

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

onde \vec{g} é a aceleração da gravidade local e vale, aproximadamente, 9,8 m/s². Em alguns problemas, esse valor é arredondado para 10m/s².



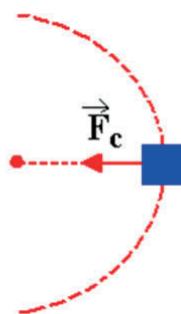
Fonte:<http://sesi.webensino.com.br/>

Figura 4 – Força-peso é a atração gravitacional que o planeta exerce sobre os corpos

Comumente, no dia a dia, nós nos referimos ao nosso peso, descrevendo a nossa massa. Por exemplo: eu peso 70 kg. Em Física, isso está errado! Esse é valor de nossa massa. O valor do peso é o produto da massa pela intensidade da aceleração da gravidade local. Admitindo $g = 10\text{m/s}^2$, o valor correto do peso é $P = 70 \cdot 10 = 700\text{ N}$.

- a) **Força centrípeta:** Força que atua na direção radial, voltada para o centro de uma trajetória circular. É responsável pela variação da direção e do sentido do vetor velocidade.

$$\vec{F}_{cp} = m\vec{a}_{cp}$$



- b) **Força elástica:** O estudo da força que atua em meios elásticos foi feito por Hooke. Para entendermos o enunciado da Lei de Hooke, vamos imaginar um experimento no qual se usa uma mola, cujo comprimento inicial é igual a x_0 . Ao aplicarmos forças na extremidade livre dessa mola, vamos observar diferentes deformações sofridas por ela:

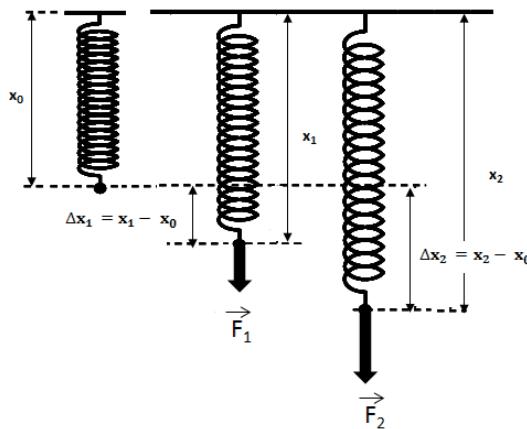


Figura 5 – Uma mola submetida a diferentes intensidades de força e sua deformação

Se construirmos um gráfico da força *versus* a deformação, temos:

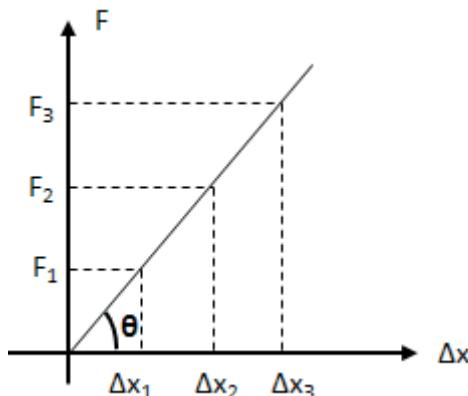


Figura 6 – Gráfico da força aplicada em uma mola versus a deformação sofrida

Hooke percebeu que a inclinação da curva do gráfico \overrightarrow{F} versus Δx dependia da mola utilizada no experimento. Ou seja, quanto mais a mola fosse difícil de deformar (menos elástica), mais inclinada em relação ao eixo horizontal era a curva obtida no gráfico. Porém, quanto mais a mola fosse fácil de变形ar (mais elástica), menos inclinada em relação ao eixo horizontal era a curva obtida no gráfico.

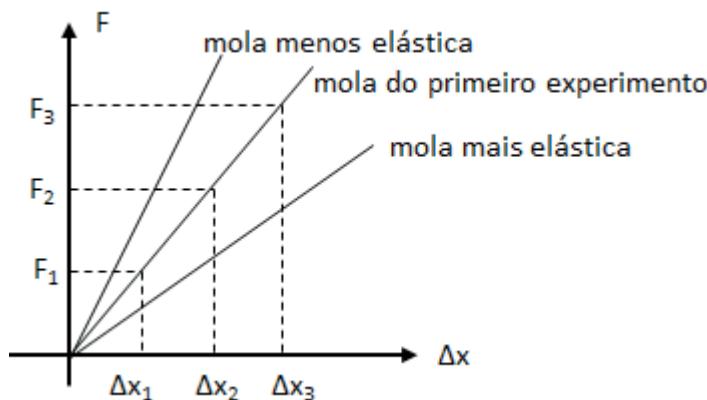


Figura 7 – A inclinação do gráfico da força aplicada em uma mola versus a deformação sofrida indica a constante elástica da mola

Hooke, então, concluiu que a inclinação da curva do gráfico \vec{F} versus Δx indicava a constante elástica da mola (K).

Logo, podemos escrever matematicamente que:

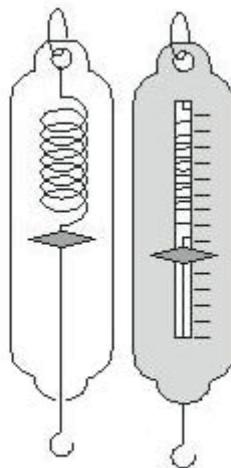
$$K = \operatorname{tg} \theta = \frac{\text{cateto oposto}}{\text{cateto adjacente}} = \frac{F}{\Delta x}$$

Por conseguinte,

$$F = K \Delta x$$

Ou seja, a força F , aplicada sobre uma mola é diretamente proporcional à sua deformação.

A partir do enunciado da Lei de Hooke, é possível construir um instrumento capaz de medir a intensidade de forças. Esse instrumento é chamado de dinamômetro.



Fonte:<http://www.brasilescola.com/>

Figura 8 – Esquema de um dinamômetro

9.2.1 UNIDADE DE FORÇA

No sistema Internacional de Unidades (SI), a força é dada em newtons (N). Assim, 1 N é a força que, aplicada a uma de 1 kg, lhe imprime uma aceleração de 1 m/s².

Apesar de o N ser a unidade adotada pelo SI, outras unidades de força são empregadas, dentre as quais podemos citar o dina (dyn) e o quilograma-força (kgf). O dina é a força que, aplicada a um corpo de massa 1 g, lhe imprime uma aceleração de 1 cm/s². Já o quilograma-força é a força que, aplicada a um corpo de massa de 1utm, lhe imprime uma aceleração de 1m/s².

O Sistema Inglês de Unidades adota a “utm” (unidade técnica de massa). Nesse sistema, ao invés de a massa ser uma grandeza fundamental, adota-se a força como tal, de sorte que a unidade de massa é determinada pela definição de peso:

$$P = mg$$

$$m = \frac{P}{g}$$

$$[m] = utm = \frac{[P]}{[g]} = \frac{kgf}{\frac{m}{s^2}}$$

Nesse sistema, a massa de 1kg pesa 1kgf, a massa de 2 kg pesa 2kgf e assim sucessivamente.

Obs.: quando empregar a unidade kgf, use o utm como unidade de massa.

9.3 TERCEIRA LEI DE NEWTON OU LEI DE AÇÃO E REAÇÃO

Em sua segunda Lei, Newton define força como uma interação entre corpos. Nessa interação, ele observou que toda ação aplicada por um corpo em outro recebe em si uma reação de mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário.

Para entendermos bem essa definição, vamos analisar o seguinte exemplo: imagine duas garotas de patins, uma de frente para a outra. Admita que uma delas empurre a outra, aplicando uma força de ação \vec{F} . A terceira Lei de Newton afirma que essa força de ação gera uma força de reação de mesma intensidade, de mesma direção, porém, de sentido contrário ao dela. Assim, ambas as meninas, inicialmente paradas, se movem na mesma direção, contudo, em sentidos contrários, como mostrado na figura a seguir:

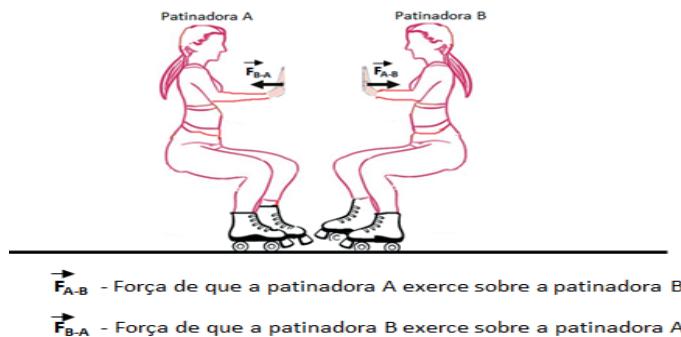


Figura 9 – Força de ação e reação

Note que as forças ação e reação atuam em corpos diferentes e que

$$\vec{F}_{\text{ação}} = -\vec{F}_{\text{reação}}$$

$$F_{\text{ação}} = F_{\text{reação}} \quad F_{\text{ação}} = F_{\text{reação}} \quad (\text{IV})$$

9.3.1 FORÇA NORMAL

Quando colocamos um corpo sobre uma superfície, ele tende a comprimir-la, exercendo uma ação sobre ela. A superfície reage a essa ação, aplicando uma força que denominamos força de reação normal (\vec{N}).

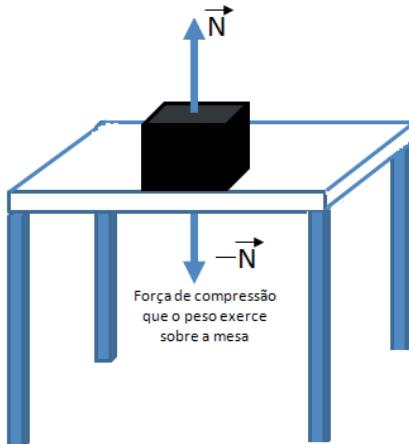


Figura 10 – Força normal não é reação da força-peso

9.3.2 FORÇA DE REAÇÃO AO PESO

Já sabemos que o planeta Terra exerce uma força sobre os corpos, atraindo-os para o seu centro. Essa força é denominada peso. Pela Terceira Lei de Newton, sabemos que toda força de ação de um corpo sobre outro corresponde a uma força de reação em si, de mesma intensidade, mesma direção e de sentido contrário à força de ação. Assim, qual é a força de reação da força-peso?

A força de reação à força-peso atua no centro da Terra, tem direção vertical com sentido para cima e sua intensidade é igual à intensidade da força-peso. É importante destacar que a força de reação ao peso não é a Força Normal.

9.4 FORÇAS EM UM CORPO SOB UM PLANO INCLINADO

Considere um corpo de massa m descendo um plano inclinado sem atrito.

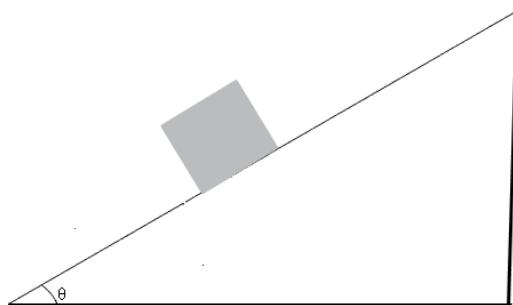


Figura 11 – Corpo descendo um plano inclinado sem atrito

Quais forças atuam sobre esse corpo? A força-peso, \vec{P} , que o planeta exerce, atraindo-o para seu centro e a força de reação Normal, \vec{N} , exercida pelo plano inclinado sobre o corpo.

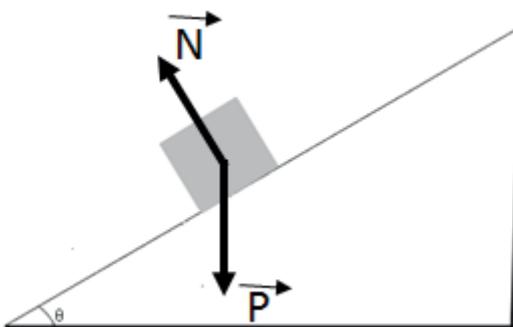


Figura 12 – Forças que atuam num corpo descendo um plano inclinado sem atrito

Se fizermos a decomposição da força-peso no sistema cartesiano, obtemos as componentes P_x e P_y :

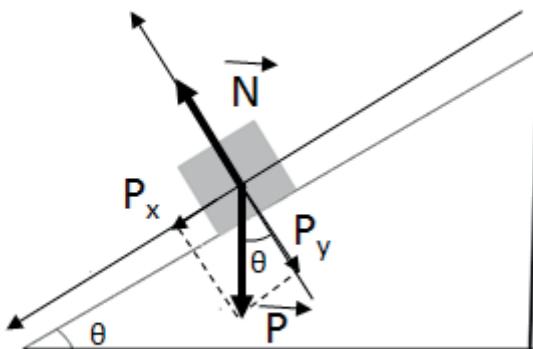


Figura 13 – Decomposição da força peso no sistema cartesiano de um corpo deslizando um plano inclinado sem atrito

Assim, podemos escrever que:

Na direção X:

$$P_x = ma$$

$$P \sin\theta = ma$$

$$mg \sin\theta = ma$$

$$a = g \sin\theta \quad a = g \sin\theta \quad (\text{V})$$

Na direção Y:

$$N = P_y$$

$$N = P \cos\theta$$

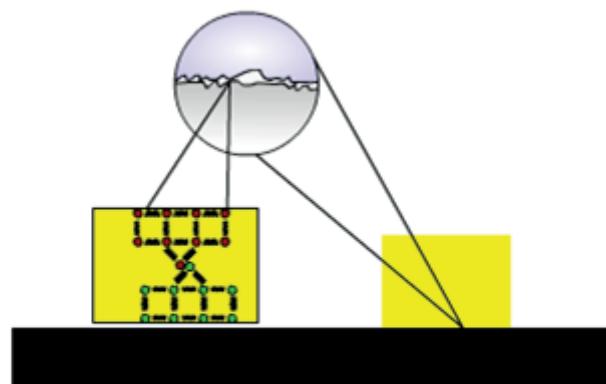
$$N = mg \cos\theta \quad N = mg \cos\theta \quad (\text{VI})$$

9.5 FORÇA DE ATRITO

Diferentes interpretações sobre o atrito foram feitas ao longo dos tempos, porém, somente mais recentemente é que um modelo mais preciso sobre o fenômeno pôde explicá-lo melhor, tendo em vista a invenção dos microscópios de força atômica

e de tunelamento, e de microbalanças que permitem medir forças de interação extremamente pequenas entre átomos das superfícies.

Devido à proximidade entre as moléculas dos materiais em contato, nas pequenas regiões em que ele efetivamente ocorre, surgem forças eletromagnéticas de adesão que “soldam” essas regiões. Nesse sentido, quando uma superfície é arrastada sobre a outra, acontecem sucessivas soldas, rupturas e deslizamento, num processo conhecido por *stick-slip* (gruda-escorrega), que dá origem à força de atrito.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 14 – Forças de interação eletromagnética dão origem ao atrito

Podemos, pois, definir força de atrito como aquela que surge em oposição ao movimento relativo entre duas superfícies em contato. Note, portanto, que é errado dizer que a força de atrito é contrária ao movimento. Isso nem sempre é verdade!

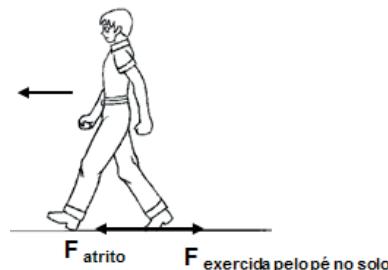


Figura 15 – Força de atrito nem sempre é contrária ao movimento

Veja que, ao pressionar o solo, se não houver a força de atrito no sentido do movimento, o pé escorrega.

9.5.1 LEIS DO ATRITO

Existem dois tipos de atrito: estático e cinético (ou dinâmico). Quando existe força atuando em um corpo, mas ele não se move, o atrito é denominado estático; quando há força atuando num corpo e ele se move, o atrito é chamado de cinético ou dinâmico.

1^a LEI

Considere um bloco de massa m sobre uma superfície que oferece atrito, sendo N o módulo da força normal às superfícies em contato, μ_s , o coeficiente de atrito estático (que depende, entre outros fatores, da natureza das superfícies em contato), F_{ae} , o módulo da força de atrito estático entre essas superfícies, pode ser expresso pela seguinte inequação:

$$F_{ae} \leq N\mu_s$$

Por essa inequação, é possível concluir que a força de atrito pode crescer: assumindo desde um valor nulo (quando não há forças tentando colocá-lo em movimento) até um valor máximo, a partir do qual, se uma força em sentido contrário atuar, colocará o corpo em movimento.

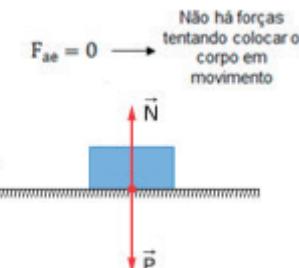


Figura 16 – Bloco em repouso sobre uma superfície horizontal

Agora, imagine que inclinemos vagarosamente a superfície na qual o bloco está apoiado. Vai surgir uma componente da força-peso, de intensidade P_x , que tenderá a mover o bloco. Todavia, enquanto a intensidade de P_x não for maior que o produto $N\mu_s$, o bloco ficará em repouso.

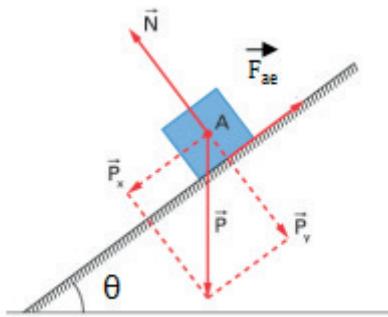


Figura 17 – Inclinando a superfície surge uma força que tende a por o bloco em movimento, mas ocorre a atuação da força de atrito estático

Quando a intensidade de P_x atingir o valor igual ao produto $N\mu_s$, a força de atrito estático assumirá seu valor máximo $F_{ae(\text{máx})} = P_x$, o ângulo θ será crítico $= \theta_c$ e, nesse caso, o bloco ficará na iminência do movimento.

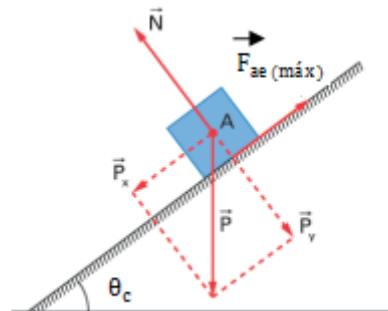


Figura 18 – Quando a superfície é inclinada no ângulo crítico, a força de atrito estático assume seu valor máximo: o bloco fica na iminência do movimento

$$F_{ae(\text{máx})} = N\mu_s$$

Nessa situação, podemos calcular o valor do coeficiente de atrito estático entre as superfícies em contato, que terá valor igual a:

$$\mu_s = \operatorname{tg} \theta_c$$

2ª LEI

Qualquer inclinação maior que o ângulo θ_c produzirá um valor P_x maior que $F_{ae(\text{máx})}$ e, por conseguinte, o bloco entrará em movimento. Surge, então, a

força de atrito cinético, cujo módulo F_{ac} , suposto constante (o que é válido para baixas velocidades), é dado pela equação:

$$F_{ac} = N\mu_c$$

μ_c é o coeficiente de atrito cinético, o qual depende do material das superfícies em contato.

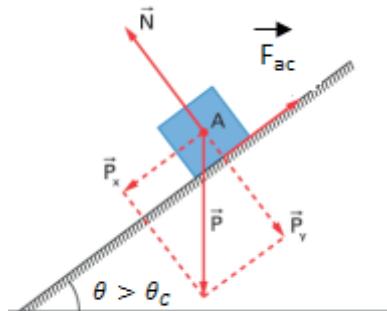


Figura 19 – Quando a superfície é inclinada num ângulo maior que o ângulo crítico, a força de atrito cinético, com intensidade constante, começa a atuar

3^a LEI

A área de contato não interfere na intensidade da força de atrito. Assim, tanto faz a posição do corpo, isso não implicará na variação da força de atrito.

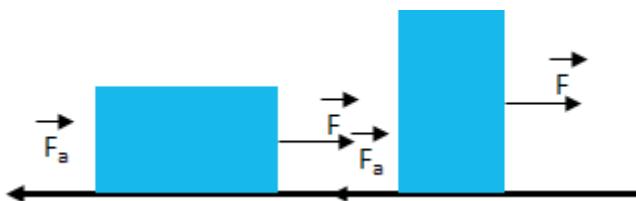


Figura 20 – A força de atrito é independente da área de contato do corpo com a superfície

9.6 TRABALHO DE UMA FORÇA

No dia a dia, utilizamos termos ou palavras que, em Física, têm conceitos diferentes do uso corrente. Um exemplo disso é o conceito de trabalho. No cotidiano, usamos a palavra *trabalho* para nos referirmos a uma atividade física ou intelectual, porém, em Física, a grandeza trabalho está relacionada com o deslocamento que uma força é capaz de realizar.

9.6.1 TRABALHO DE UMA FORÇA CONSTANTE

Considere uma força constante \vec{F} que atua num corpo, deslocando-o do ponto A para o ponto B, a uma distância d.

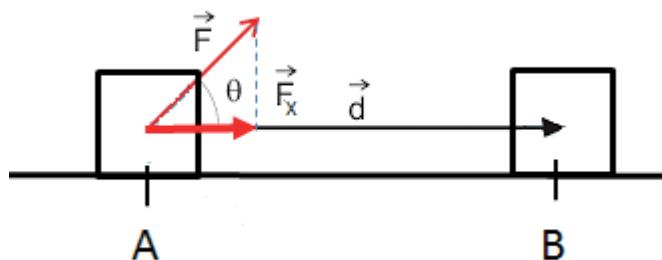


Figura 21 – A força realizando trabalho

É possível notar que a parcela da força constante \vec{F} que, de fato, concorre para a realização do deslocamento do ponto A para o ponto B, é a componente \vec{F}_x . Por isso, define-se, matematicamente, trabalho mecânico, como a grandeza escalar igual ao produto da força pelo deslocamento. Isso significa que o cálculo de trabalho (τ) é dado por:

$$\tau = \vec{F} \cdot \vec{d} \cos\theta$$

Analizando essa equação, podemos chegar a três casos:

1o Caso: trabalho positivo ou motor: estabelece-se quando a força contribui para o deslocamento. Nesse caso, o ângulo entre os vetores força e deslocamento está compreendido no intervalo $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ou $270^\circ < \theta \leq 360^\circ$

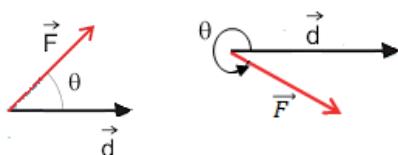


Figura 22 - Trabalho motor

2o Caso: trabalho negativo ou resistente: estabelece-se quando a força se opõe ao deslocamento. A força de atrito, por exemplo, pode realizar um trabalho resistente, opondo-se ao movimento de um corpo. Nesse caso, o ângulo entre os ve-

tóres força e deslocamento está compreendido no intervalo $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ou $180^\circ \leq \theta < 270^\circ$



Figura 23 – Trabalho resistente

3º Caso: trabalho nulo: estabelece-se quando a força é nula ou quando o deslocamento é perpendicular à força aplicada. Assim, a força não tem nenhuma relação com o deslocamento. Nesse caso, o ângulo entre os vetores força e deslocamento é $\theta = 90^\circ$ ou $\theta = 270^\circ$

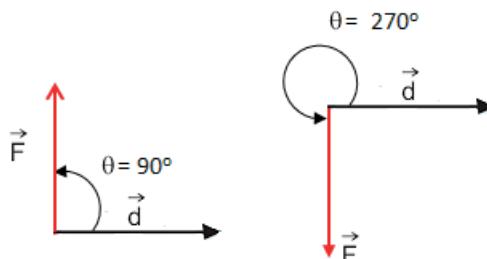


Figura 24 – Trabalho nulo

9.6.2 TRABALHO DE UMA FORÇA VARIÁVEL

Considere um experimento que utiliza uma mola, de constante elástica K , à qual se aplicam diferentes intensidades de força, obtendo-se diferentes deformações Δx .

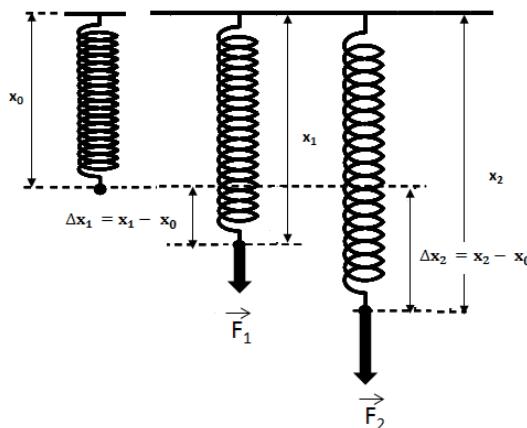


Figura 25 – Força elástica

Construindo o gráfico da intensidade da força pela deformação da mola, temos:

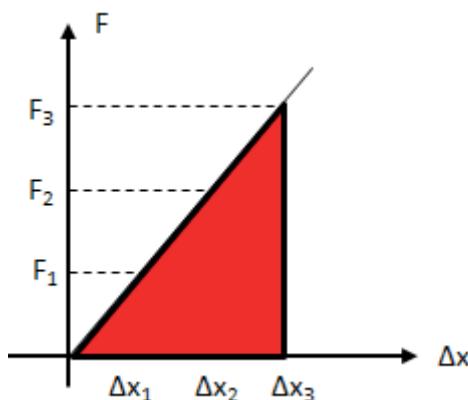


Figura 26 – Trabalho da força elástica

Dessa forma, o trabalho de uma força variável pode ser calculado pela área sob a curva do gráfico força versus deslocamento (deformação).

$$\tau = A_{\text{gráfico } F \times \text{deslocamento}}$$

$$\tau = \frac{\text{base} \cdot \text{altura}}{2}$$

$$\tau_{\text{F elástica}} = \frac{\Delta x \cdot F}{2}$$

Pela Lei de Hooke, temos:

$$F_{elástica} = k\Delta x$$

$$\tau_{F_{elástica}} = \frac{\Delta x \cdot k\Delta x}{2}$$

$$\tau_{F_{elástica}} = k \frac{\Delta x^2}{2} \quad \tau_{F_{elástica}} = k \frac{\Delta x^2}{2}$$

Assim, o uso do cálculo da área sob a curva do gráfico força versus deslocamento é um recurso matemático muito útil para a determinação do trabalho de uma força variável.

9.6.3 UNIDADES DE TRABALHO DE UMA FORÇA

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de trabalho de uma força é o newton vezes o metro(N.m) ou seja, joule (J).

9.7 POTÊNCIA

Imagine duas forças que realizam o mesmo trabalho, todavia, uma promove o mesmo deslocamento num tempo menor do que outra.

Nesse caso, definimos potência como sendo a grandeza Física escalar que mede a rapidez com que uma força realiza um trabalho.

Considere uma máquina que aplica uma força \vec{F} sobre um corpo, promovendo um deslocamento \vec{d} , num certo intervalo de tempo Δt , portanto, realizando trabalho numa velocidade média (vM). Define-se matematicamente a potência como a razão entre o trabalho realizado e o intervalo de tempo gasto para realizá-lo, ou produto da Força pela velocidade média.

$$Pot = \frac{\tau}{\Delta t}$$

Como, pela definição de trabalho:

$$\tau = F \cdot d$$

Então:

$$Pot = \frac{F \cdot d}{\Delta t}$$

Como

$$v_M = \frac{d}{\Delta t}$$

$$Pot = F \cdot v_M$$

9.7.1 UNIDADES DE POTÊNCIA

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a potência é dada em joule por segundo (J/s), ou seja, o watt (W).

9.8 ENERGIA MECÂNICA E SUA CONSERVAÇÃO

O conceito de energia é bastante complexo, em Física. De forma bastante simples, costuma-se definir energia como a capacidade que um sistema tem de realizar trabalho. Porém, de forma mais formal, podemos afirmar que energia é uma quantidade que se conserva em sistemas nas quais forças realizam trabalho.

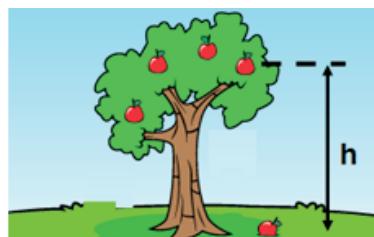
A energia mecânica (EM) é a soma de dois tipos de energia:

- A energia potencial (E_p): energia acumulada;
- A energia cinética (E_c): energia associada ao movimento.

$$E_M = E_p + E_c$$

A energia relacionada à posição de uma partícula de massa m , no sistema de força considerado, é denominada energia potencial (E_p). A energia potencial pode ser gravitacional ou elástica.

A energia potencial está relacionada à altura que uma partícula de massa m se encontra em relação a um referencial dentro de um campo gravitacional.



Fonte: <http://www.smartkids.com.br> (adaptado)

Figura 27 – Partícula de massa m, a uma altura h

Com relação ao solo, a maçã de massa m tem associado ao campo gravitacional uma energia potencial igual a

$$E_{p\ grav} = mgh$$

onde g é o módulo da aceleração da gravidade.

A energia potencial elástica está associada à deformação de um sistema elástico, como, por exemplo, uma mola, de constante elástica k e com deformação Δx .

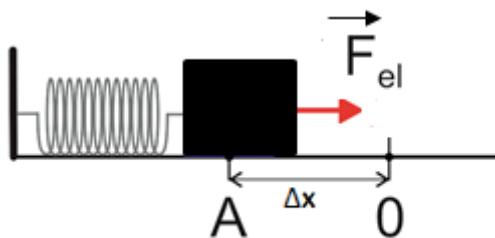
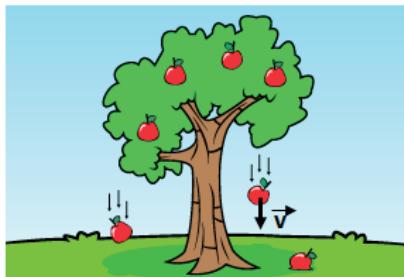


Figura 28 – Mola de constante elástica k, comprimida de Δx

Com relação a um sistema de referência, a mola tem associada uma energia potencial igual a

$$E_{p\ elástica} = \frac{k\Delta x^2}{2}$$

A energia associada ao movimento, denominada energia cinética (E_c), está relacionada à velocidade (v) da partícula de massa m sobre a qual uma força realiza trabalho e pode ser calculada a partir da expressão:



Fonte: <http://www.smartkids.com.br> (adaptado)

Figura 29 – Partícula de massa m em queda com velocidade v

$$E_C = \frac{mv^2}{2}$$

O Princípio da Conservação da Energia Mecânica está no fato de a energia potencial se transformar em energia cinética e vice-versa, se não houver forças dissipativas no sistema. Isso significa que, se não houver forças dissipativas, a soma das parcelas de energia cinética e potencial do sistema (energia mecânica) se manterá sempre constante.

$$E_M = E_p + E_C$$

9.8.1 RELAÇÃO ENERGIA CINÉTICA E TRABALHO DE UMA FORÇA

a) Teorema da variação da Energia Cinética

Considere uma força resultante \vec{F} que atua durante certo intervalo de tempo Δt sobre um bloco de massa m e velocidade inicial \vec{v}_A . Após a atuação dessa força, o bloco de massa m percorre uma distância d e assume uma velocidade \vec{v}_B .

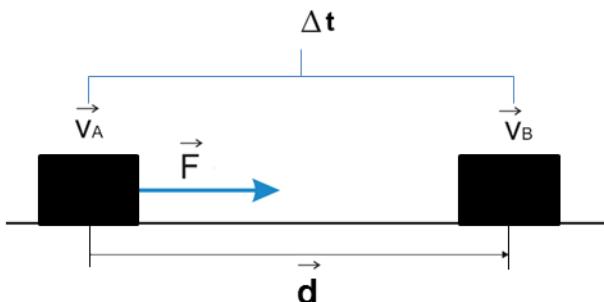


Figura 30 – Trabalho e variação da energia cinética

Para calcularmos o trabalho da força \vec{F} durante o deslocamento \vec{d} , fazemos:

$$\tau = F \cdot d \cdot \cos\theta$$

$$\theta = 0^\circ$$

Pela 2^a Lei de Newton, em que $F = ma$, então:

$$\tau = m \cdot a \cdot d$$

Utilizando a equação de Torricelli para um MRUV, temos:

$$a \cdot d = \frac{v^2 - v_0^2}{2}$$

Então:

$$\tau = m \left(\frac{v^2}{2} - \frac{v_0^2}{2} \right)$$

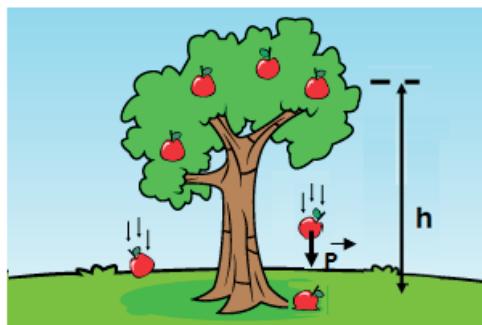
$$\tau = m \frac{v^2}{2} - m \frac{v_0^2}{2}$$

$$\tau = \Delta E_C$$

Ou seja, o trabalho da força resultante que atua sobre o corpo é igual à variação da energia cinética.

b) Trabalho da força-peso:

Considere um corpo de massa m , uma maçã, por exemplo, que cai de uma altura h em relação a um dado referencial:



Fonte: <http://www.smartkids.com.br> (adaptado)

Figura 31 – Trabalho da força-peso e variação da energia potencial

Para calcularmos o trabalho da força-peso para deslocar a maçã do alto da macieira até o chão, utilizaremos o teorema da energia cinética:

$$\tau = \Delta E_c$$

$$\tau = E_{c\ final} - E_{c\ inicial}$$

Mas a Energia Mecânica total do sistema é constante, pois não há forças dissipativas, apenas a força peso. Desse modo:

$$E_{m\ inicial} = E_{c\ inicial} + E_{p\ inicial}$$

$$E_{m\ final} = E_{c\ final} + E_{p\ final}$$

e

$$E_{m\ inicial} = E_{m\ final},$$

então:

$$E_{c\ inicial} + E_{p\ inicial} = E_{c\ final} + E_{p\ final}$$

Como a $E_{c\ inicial} = E_{p\ final}$ = zero, temos que $E_{p\ inicial} = E_{c\ final}$, ou seja:

$$\tau = E_{c\ final} = E_{p\ inicial}$$

$$\tau = mgh$$

Note, portanto, que o trabalho da força-peso é igual à variação da energia potencial.

9.8.2 UNIDADES DE ENERGIA

As Unidades de Energia são as mesmas de trabalho, pois, como vimos, o trabalho é a grandeza que mede a variação da energia. Assim, no Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de energia é (N.m), ou seja, joule (J).

9.9 IMPULSO E QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Você sabia que o comandante do Titanic, antes de o navio se chocar com o enorme *iceberg*, já tinha percebido a pedra gigante a uma distância de aproximadamente 1km?

Mesmo assim, a tripulação não conseguiu parar ou sequer mudar a trajetória do movimento do imenso navio, para impedir que ele se chocasse com o enorme bloco de gelo.



Fonte: <http://veja.abril.com.br/>

Figura 32 – O desastre do Titanic

Sabemos que essa dificuldade tem relação com uma grandeza física chamada de Quantidade de Movimento.

Para compreender o significado da grandeza física quantidade de movimento, imagine a seguinte experiência: ela consiste num experimento bastante famoso, denominado Pêndulo de Newton. Ele se constitui de alguns pêndulos simples (normalmente com cinco esferas) posicionados lado a lado, como está indicado na figura a seguir.

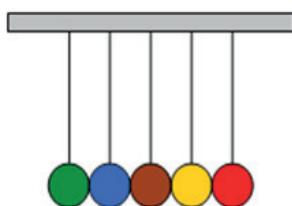


Figura 33 – O pêndulo de Newton

Quando afastamos uma esfera de uma das extremidades e a soltamos, ela desce e bate na primeira esfera ao lado dela. Observa-se, em seguida, que a esfera da outra extremidade adquire movimento, com a mesma velocidade da bola inicialmente solta (sabemos disso, porque a esfera sobe à mesma altura em que a primeira foi solta), como é evidenciado na figura a seguir:

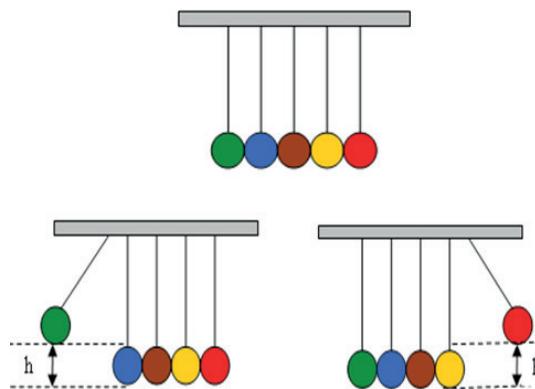


Figura 34 – O pêndulo de Newton e a relação velocidade e massa para uma esfera

Interessante observar que, se repetirmos esse procedimento para as duas primeiras esferas, verificaremos que as duas últimas esferas sobem, na mesma altura em que as outras duas foram soltas, após o choque acontecer.

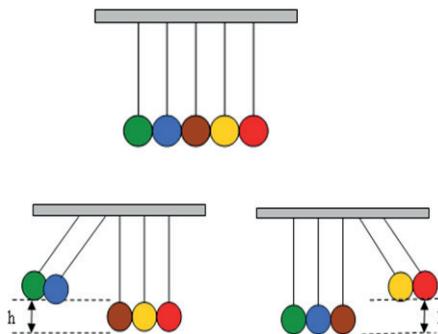


Figura 35 – O pêndulo de Newton e a relação velocidade e massa para duas esferas

O que isso quer dizer? Qual a relação disso com o exemplo do Titanic?

É possível inferir sobre a existência de certa quantidade de movimento que se transfere de um corpo para outro.

Ou seja, uma esfera ou mais transferem seu movimento para outra, ou outras, numa quantidade certa.

Contudo, como medir essa quantidade?

Pelo próprio experimento, é possível verificar que a quantidade de movimento depende da massa m e da velocidade \vec{v} , porque cada esfera transfere um

movimento com a mesma velocidade para outra esfera de mesma massa. Por isso, se pensarmos em termos de quantidade, podemos obtê-la a partir da seguinte expressão:

$$\vec{Q} = m\vec{v}$$

Newton, em seus estudos, mostrou que a transferência da quantidade de movimento depende da direção e do sentido do movimento, por isso é considerada uma grandeza vetorial.

No caso do Titanic, mesmo sabendo da existência do *iceberg* a uma distância de 1 km, a tripulação não conseguiu alterar significativamente o módulo da quantidade de movimento do navio, nem mesmo sua direção. É claro que, quanto maior a velocidade e a massa do corpo, maior é sua quantidade de movimento, de sorte que a tripulação não conseguiu evitar a catástrofe.

9.9.1 UNIDADE DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de quantidade de movimento é o $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$.

9.9.2 IMPULSO E VARIAÇÃO NA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Empurrar ou puxar um corpo não significa apenas aplicar força sobre ele, mas exercer essa força por um determinado intervalo de tempo.

É possível notar que, quanto maior for o tempo em que a força for aplicada ao corpo, maior será o efeito que se produzirá na velocidade desse corpo.

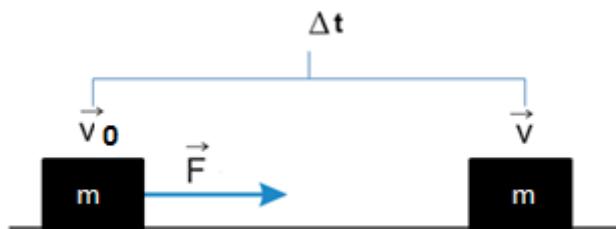


Figura 36 – Definição de impulso e sua relação com quantidade de movimento

Pela figura acima, podemos perceber que a aplicação da força resultante num determinado intervalo de tempo produziu uma variação na velocidade do corpo. Visto que a massa não se modificou, manteve-se constante, podemos escrever matematicamente que:

$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Como o produto $\mathbf{m}\vec{v}$ (massa vezes velocidade) é a quantidade de movimento, podemos escrever que:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{Q}$$

Ou seja, o produto da força resultante pelo intervalo de tempo produziu uma variação na quantidade de movimento do corpo.

Em Física, esse produto da força resultante pelo intervalo de tempo, o qual provoca uma variação na quantidade de movimento do corpo, é uma grandeza vetorial denominada impulso.

$$\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{Q}$$

Se traçarmos o gráfico da Força constante que atua sobre um corpo *versus* o tempo, a área sob a curva obtida é igual à variação da quantidade de movimento. Observe:

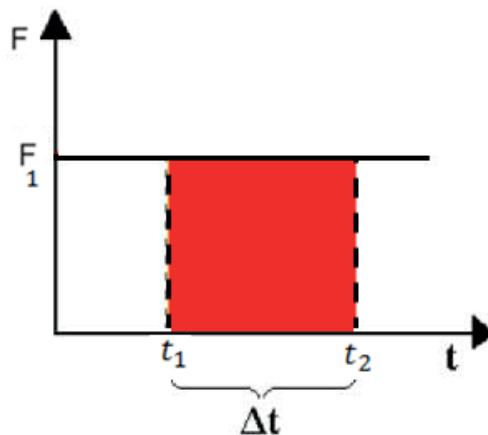


Figura 37 – Área sob a curva do gráfico força versus tempo é igual ao impulso

$$A_{gráfico\ Fxt} = F \Delta t = \Delta Q$$

Quando a força resultante é variável, o cálculo da área sob a curva do gráfico Força versus Tempo é também igual ao impulso.

9.9.2.1 UNIDADE DE IMPULSO

As unidades de impulso são as mesmas de quantidade de movimento. Portanto, no Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de impulso é o $\frac{kg \cdot m}{s}$.

9.9.3 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A partir da definição de Impulso, é possível concluir que:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{Q}}{\Delta t}$$

Isso quer dizer que, para haver variação na quantidade de movimento de um corpo, num determinado intervalo de tempo, é preciso que haja uma força resultante aplicada.

Por consequência, na inexistência de força resultante, isto é, se, ao somarmos todas as forças que atuam sobre um corpo e o resultado for zero, então $\Delta \vec{Q} = \mathbf{0}$, de forma que podemos escrever:

$$\vec{Q}_{final} - \vec{Q}_{inicial} = \mathbf{0}$$

Logo:

$$\vec{Q}_{final} = \vec{Q}_{inicial}$$

Podemos então concluir que, se o somatório das forças que atuam sobre um corpo é zero, a quantidade de movimento do corpo é constante, ou seja, se conserva.

Como a quantidade de movimento é uma grandeza vetorial, a conservação é válida tanto para módulo quanto para direção e sentido.

É importante notar que a conservação da quantidade de movimento só ocorre para um sistema isolado, pois o somatório das forças que atuam sobre o corpo precisa ser zero, logo, não pode haver qualquer tipo de interação de caráter externo. Num sistema isolado, as partículas constituintes podem interagir entre si, mas não podem interagir com elementos externos.

10 GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Desde a antiguidade, o homem busca explicações sobre o universo e os astros. Os primeiros registros astronômicos datam de aproximadamente 3000 a.C. e se devem aos chineses, aos babilônios e aos egípcios.

Porém, foi nos anos 600 a.C. e 400 a.C. que houve, por parte dos gregos, um estudo mais detalhado sobre esse tema.

Tales de Mileto (-624 – 546 a.C.) pensava que a Terra era plana, tinha um formato de um disco plano. Nessa época, falava-se, inclusive, na existência de um grande abismo, onde o mundo acabava formando uma enorme cachoeira.



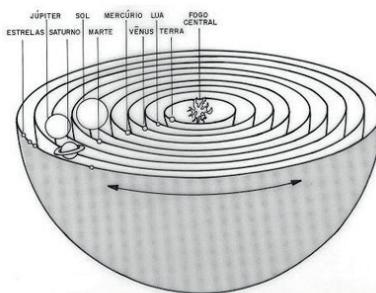
Fonte: <http://info.abril.com.br/noticias/ciencia>



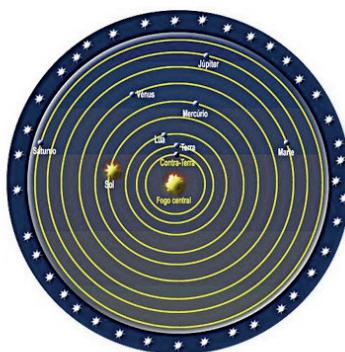
Fonte: <http://super.abril.com.br/blogs/cienciamaluca/sociedade-da-terra-plana>

Figura 1 – Concepção da Terra como tendo um formato plano

Para Pitágoras (-572 – 497 a.C.), a Terra e todos os demais corpos celestes eram esféricos e transportados por esferas transparentes diferentes, as quais se movimentavam em torno de um foco central (que não era o Sol), que ele chamou de o fogo central. Com seu modelo, Pitágoras foi capaz de explicar o fenômeno do dia e da noite.



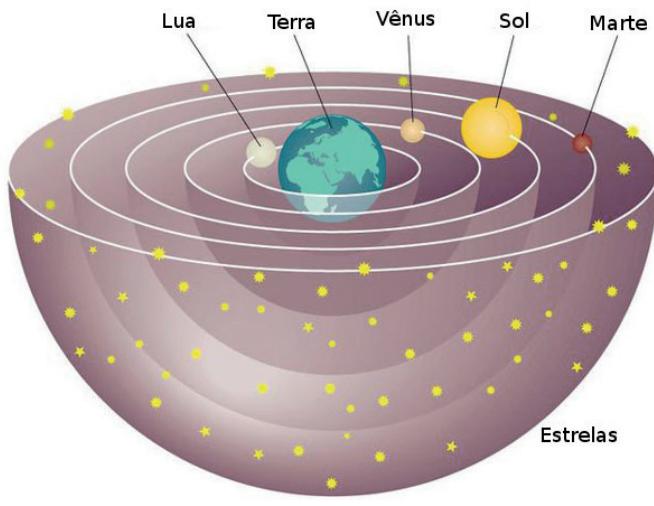
Fonte: <http://portaldastronomia.org>



Fonte: <http://templodeapolo.net>

Figura 2 – Modelo de Pitágoras

Aristóteles de Estagira (384 – 322 a.C.) afirmou que o universo era finito e esférico e que a Terra se estabelecia em seu centro. Com esse modelo, foi capaz de explicar, além dos fenômenos do dia e da noite, os eclipses da Lua e do Sol.



Fonte: <http://astronomia.blog>

Figura 3 – Modelo de Aristóteles

Durante muito tempo, o modelo aristotélico foi utilizado e aceito como verdade. Contudo, inúmeras observações astronômicas relativas às posições dos planetas no céu mostravam algumas incoerências, exigindo algumas correções, como a teoria de epiciclos de Ptolomeu.

Ptolomeu percebeu que os cinco planetas visíveis, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, apresentavam um movimento retrógrado, quando comparados às estrelas fixas no céu, o que não podia ser explicado pelo modelo de Aristóteles. Vejamos o caso de Marte: por exemplo, se observarmos atentamente seu movimento no céu, veremos que noite após noite ele aparece em posição diferente, movimentando-se num certo sentido específico. Porém, depois de uma sequência de dias, Marte parece voltar a posições anteriores para, após outro período de tempo, retomar o movimento no sentido anterior.

Para explicar esse fenômeno mantendo a ideia de Aristóteles, da Terra como centro do universo, Ptolomeu propôs que, ao invés de girarem em torno da Terra, cada planeta descrevia um movimento circular cujo centro também girava em torno da Terra. A combinação desses dois movimentos gerava o movimento cuja trajetória era uma epicicloide.

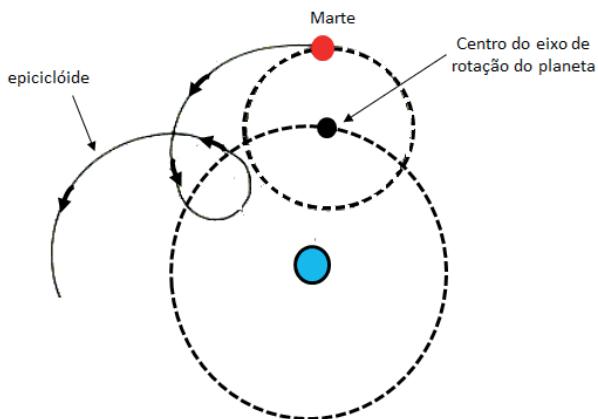
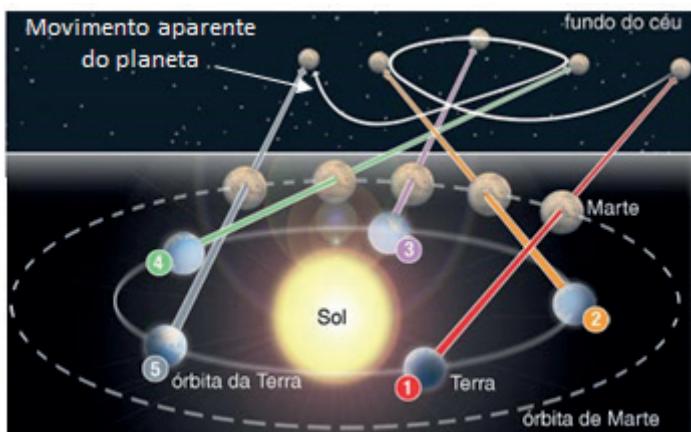


Figura 4 – Modelo dos epíciclos proposto por Ptolomeu

O modelo de epíciclos de Ptolomeu tinha o mérito de não apenas explicar qualitativamente o fenômeno, mas também de descrevê-lo matematicamente, por isso, foi aceito durante 15 séculos.

Propondo um modelo mais simples e que explicasse todos os fenômenos até então previstos por Ptolomeu, Copérnico publicou um trabalho no qual o Sol, e não a Terra, ocupava o centro do nosso sistema planetário.

Copérnico mostrou que o aparente movimento retrógrado de Marte e de outros planetas se dava pela diferença de velocidade de translação entre eles e a Terra: como a Terra tem uma velocidade maior, ao passar entre o planeta e o Sol, a órbita aparente do planeta é a de um movimento retrógrado.



Fonte: <http://astronomiaqui.com>

Figura 5 – Explicação de Copérnico para o aparente movimento retrógrado de Marte

O modelo heliocêntrico de Copérnico previu com bastante precisão o raio das órbitas dos planetas, resultado que o modelo geocêntrico não era capaz de oferecer.

Uma vez que o modelo de Copérnico contrariava opiniões tanto científicas quanto religiosas, sua obra foi proibida pela Igreja.

10.1 LEIS DE KEPLER

Contudo, o trabalho de Copérnico inspirou novos estudos. Kepler, a partir dos cálculos dos raios das órbitas dos planetas realizados por Copérnico e de rigorosas observações das trajetórias dos planetas, feitas por Tycho Brahe, propôs três leis que revolucionaram os estudos astronômicos:

1^a Lei de Kepler: Os planetas, ao invés de girarem numa trajetória circular em torno do Sol, descrevem órbitas elípticas em torno dele, que, por sua vez, ocupa um dos focos da elipse.



Figura 6 – Órbitas planetárias elípticas em torno do Sol

A razão entre a distância entre os focos e o semieixo maior de uma elipse chama-se excentricidade. Assim, quanto maior for essa razão, mais excêntrica é a elipse e, quanto mais próxima de zero, mais próxima de um círculo ela é. Ora, Kepler calculou as excentricidades da órbita de cada planeta em torno do Sol e descobriu que elas são pequenas e diferentes entre si. A excentricidade da órbita da Terra, por exemplo, é da ordem de 0,017, ou seja, é praticamente circular. Por isso, é importante destacar que a excentricidade da órbita terrestre não é o que explica a existência das diferentes estações do ano (verão, primavera, outono e inverno). A diferença de estações do ano é devido à inclinação do eixo da Terra em relação a um eixo perpendicular ao plano de rotação em torno do Sol.



Fonte: www.Astronomiasingular.com

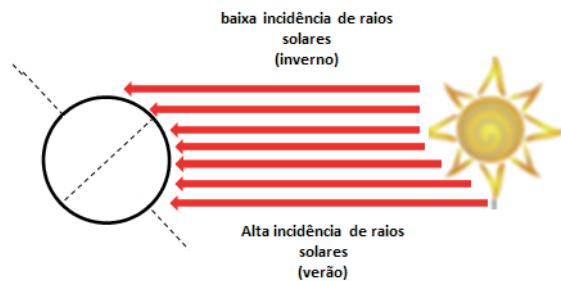


Figura 7 – Explicação para as estações do ano

2^a Lei de Kepler: O raio vetor que une qualquer planeta ao Sol descreve áreas iguais em tempos iguais. Nesse sentido, a velocidade com que os planetas descrevem sua órbita não é constante. Quando estão mais próximos do Sol, os planetas apresentam uma velocidade maior de quando estão distantes dele.

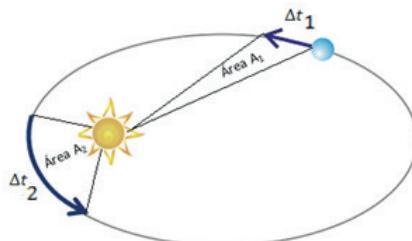


Figura 8 – Os planetas percorrem áreas iguais em tempos iguais

Matematicamente, podemos concluir:

$$\frac{A_1}{\Delta t_1} = \frac{A_2}{\Delta t_2} = k \text{ (constante)}$$

3^a Lei de Kepler: Os quadrados dos períodos (T) de rotação de dois planetas quaisquer são proporcionais ao cubo dos raios médios (R) de suas órbitas.

Matematicamente, podemos escrever:

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} = k \text{ (constante)}$$

10.2 LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE NEWTON

Apesar de Kepler, com suas leis, descrever as trajetórias dos planetas em suas órbitas em torno do Sol, foi Newton quem, baseando-se também nos trabalhos apresentados por Galileu Galilei, as interpretou a partir de seus estudos de dinâmica.

Para explicar o porquê da órbita dos planetas, Newton pressupôs que o Sol os atrai, a partir de uma força que age à distância.

Para entendermos esse raciocínio, imagine um planeta em órbita em torno do Sol, como indica a figura a seguir. Newton compreendeu que, se não houvesse nenhuma força atraindo o planeta para o Sol, sua trajetória deveria ser em direção ao ponto 2 e não ao ponto 3, como acontece.

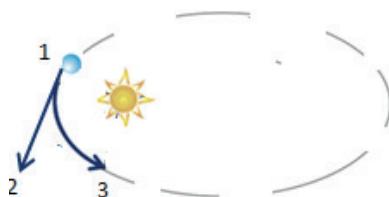


Figura 9 – Os planetas “caem” em direção ao Sol

É como se o planeta “caísse” do ponto 1 para o ponto 3. Se a força de atração proposta por Newton não existisse, pelo princípio da Inércia, o planeta deveria seguir seu movimento em linha reta. Portanto, para Newton, todo planeta sofre ação de uma força de atração em direção ao Sol.

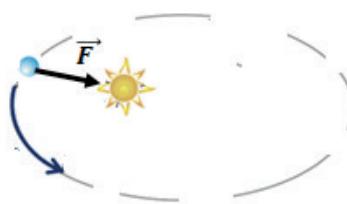


Figura 10 – O Sol exerce uma força de atração sobre os planetas

Para calcular a intensidade da força \vec{F} que o Sol exerce sobre o planeta, Newton utilizou a ideia da aceleração centrípeta, a qual estudamos no capítulo sobre movimentos circulares, demonstrando que:

$$F = G \frac{M_{\text{Sol}} \cdot m_p}{R^2}$$

$$G = \frac{4\pi^2 R^3}{T^2 M_{\text{sol}}} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

Onde

Assim, Newton, em sua Lei da Gravitação Universal, afirmou que matéria atrai matéria com intensidade proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

Com essa conclusão, ele sustentou que um corpo de massa m , o qual se encontra a uma h da superfície da Terra, é atraído para o centro do planeta por uma força que denominamos peso.

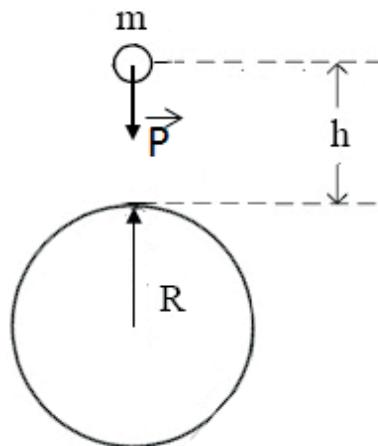


Figura 11 – Corpo de massa m atraído pela massa da Terra

Dessa forma, pode-se escrever:

$$P = G \frac{M_T \cdot m}{(R + h)^2}$$

Pela segunda Lei de Newton, sabemos que a intensidade da força-peso pode ser calculada por:

$$P = mg$$

Então:

$$mg = G \frac{M_T \cdot m}{(R + h)^2}$$

Logo:

$$g = G \frac{M_T}{(R + h)^2} \quad (\text{IV})$$

Note que o módulo da aceleração da gravidade varia com a altura h, ou seja, diminui com a altitude. Conclui-se que, apesar de a massa do corpo se manter constante, seu peso diminui à medida que ele se afasta do centro da Terra.

10.3 ATRAÇÃO DA TERRA SOBRE A LUA

A Lua é o satélite natural da Terra. Admitindo que sua órbita em torno do nosso planeta seja circular, podemos determinar seu período de rotação:

Utilizando o argumento de Newton, podemos admitir que, se a Lua gira em torno da Terra, há uma força centrípeta que a atrai para o centro do nosso planeta. Assim, a Lua “cai” em direção à Terra:

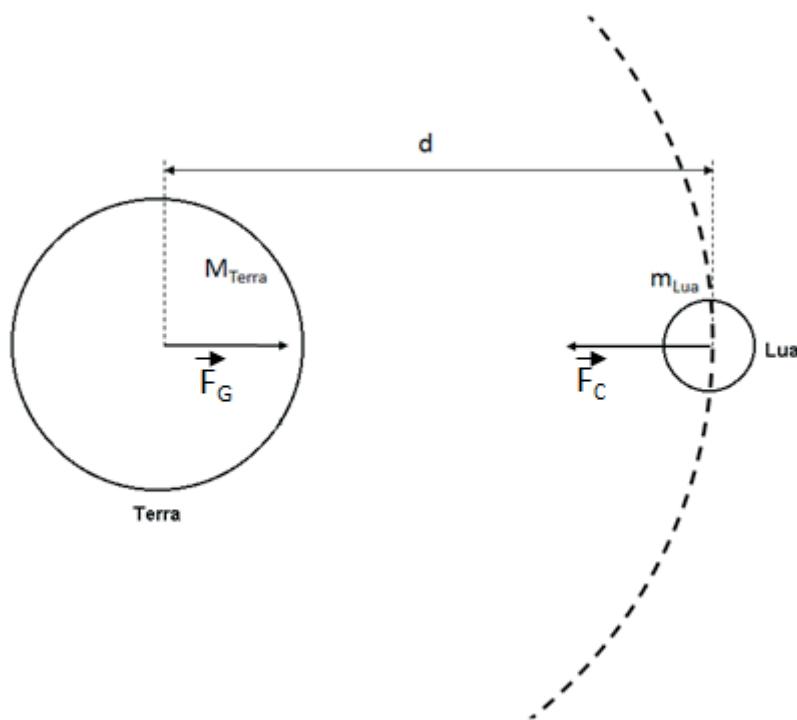


Figura 12 – A Lua girando em torno do planeta Terra

$$F_C = F_G$$

$$m_{Lua} \cdot a_C = G \frac{M_T \cdot m_{Lua}}{d^2}$$

$$a_C = G \frac{M_T}{d^2}$$

como

$$a_C = \frac{v_{Lua}^2}{d}$$

$$\frac{v_{Lua}^2}{d} = G \frac{M_T}{d^2}$$

$$v_{Lua} = \sqrt{G \frac{M_T}{d}} \quad (V)$$

E, ainda, como $v = 2\pi f R$; onde $R = d$ e $f = \frac{1}{T}$

$$\frac{4\pi^2 d}{T^2} = G \frac{M_T}{d^2}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{d^3}{GM_T}}$$

Essas equações são também válidas para qualquer satélite em órbita da Terra.

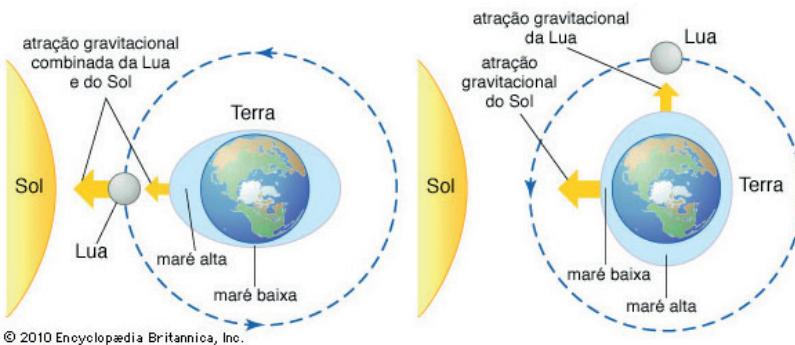
10.4 ATRAÇÃO DA LUA SOBRE A TERRA

Pela Terceira Lei de Newton, sabemos que toda ação corresponde a uma reação de mesma intensidade e sentido contrário. Assim, da mesma forma que a Terra atrai a Lua, a Lua também exerce força de atração sobre a Terra.

Como a força gravitacional tem a intensidade que varia com a distância entre os corpos dotados de massa e, levando em conta que a Lua gira em torno da Terra, não é difícil concluir que o lado da Terra que está voltado para a Lua sofre uma força de maior intensidade do que o lado que lhe está oposto.

Em decorrência, durante os movimentos da Terra, da Lua e do Sol, se consideramos as situações nas quais há um alinhamento do Sol, da Lua e da Terra, a força de atração gravitacional resultante sobre a Terra é ainda maior. A ação gravitacional da Lua sobre os oceanos é a causa do fenômeno denominado de marés, o qual se intensifica mais, quando ocorre um alinhamento com o Sol.

Os oceanos se constituem de uma imensa proporção de massa de água e, por isso, a intensidade da força gravitacional da Lua sobre eles é mais significativa.



11 ESTÁTICA

Estática é uma área de estudo da Física que estuda as condições para que um corpo submetido a um sistema de forças fique em equilíbrio.

11.1 CONCEITO DE FORÇA

Em dinâmica, vimos que Força é uma grandeza física vetorial que mede a interação entre corpos capaz de promover alterações no vetor velocidade do corpo. Porém, se a força resultante que atua sobre um corpo for zero e ele inicialmente estiver parado, a tendência é a de que ele fique parado, ou seja, em equilíbrio estático.

Neste capítulo, daremos ênfase às forças que mantêm o corpo em equilíbrio estático.

11.2 EQUILÍBRIO DE PONTO MATERIAL

Para que um ponto material (um corpo cujas dimensões são desprezíveis) esteja em equilíbrio estático (parado, em repouso), é preciso que a resultante das forças que atuam sobre ele seja igual a zero.

Como a força é uma grandeza vetorial, nós já sabemos calcular a resultante de vetores. Assim, basta escolher um dos métodos de determinação de vetores resultantes, para resolver os problemas propostos de equilíbrio material.

Sugerimos a utilização do método da decomposição de forças no sistema de coordenadas cartesianas. Para tanto, é necessário que a resultante de forças, tanto no eixo x quanto no eixo y, seja igual a zero. Ou seja:

Resultante das forças que atuam na direção x é igual a zero: $R_x = 0$; e

Resultante das forças que atuam na direção y é igual a zero, $R_y = 0$.

Dessa forma, garantimos que o ponto material não se move nem na horizontal e nem na vertical.

11.3 EQUILÍBRIO DE CORPO EXTENSO

Até agora, estudamos as condições de equilíbrio de um ponto material, isto é, consideramos situações em que as dimensões do corpo podem ser consideradas desprezíveis.

Iniciaremos o estudo do equilíbrio de corpos extensos, admitindo que eles são completamente rígidos, ou seja, que não são deformados pela ação de uma força.

11.3.1 MOMENTO DE UMA FORÇA OU TORQUE

Em nosso dia a dia, estamos acostumados a aplicar forças em corpos que podem girar em torno de um eixo, por exemplo, quando abrimos ou fechamos uma porta, apertamos um parafuso, usando uma chave de boca, ou mesmo girando uma manivela.

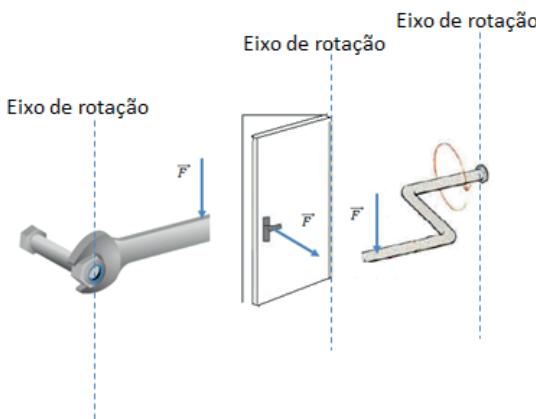


Figura 1 – Situações cotidianas nas quais forças são aplicadas a corpos rígidos, fazendo-os girar em torno de um eixo de rotação

Nessas situações, se a força for aplicada cada vez mais próxima do eixo de rotação, a dificuldade em promover a rotação é cada vez maior. Isso acontece por causa de uma grandeza momento de uma força ou torque. Essa grandeza está relacionada à capacidade de imprimir movimento de rotação a um corpo rígido.

Nesse sentido, podemos definir momento de uma força ou torque $\vec{\tau}$ como uma grandeza vetorial a qual pode ser determinada pelo produto da força aplicada pela distância, tomada perpendicularmente, do ponto de aplicação da força em relação ao eixo de rotação.

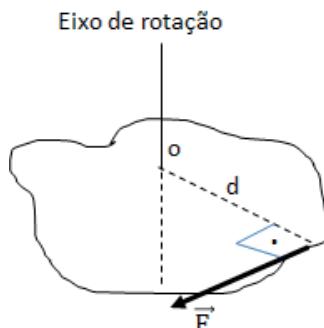


Figura 2 – Definição de momento de uma força

O módulo do momento de uma força \vec{F} , em relação a um ponto O, é determinado pela expressão

$$\tau_{F(o)} = F \cdot d$$

onde d é o braço do momento, isto é, a distância perpendicular da linha de ação da força ao eixo de rotação considerado.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de momento de uma força é o N.m.

11.3.2 SENTIDO DO VETOR MOMENTO DE UMA FORÇA

Como a grandeza momento de uma força é vetorial, precisamos definir a direção e o sentido desse vetor.

A direção é sempre perpendicular ao plano no qual a força é aplicada. O sentido do momento depende do sentido da força aplicada. Saber o sentido é importante porque é, a partir dele, que se define o sinal para o cálculo do momento de uma força.

Considere uma chave de boca com a qual se aperta ou desaperta um parafuso.

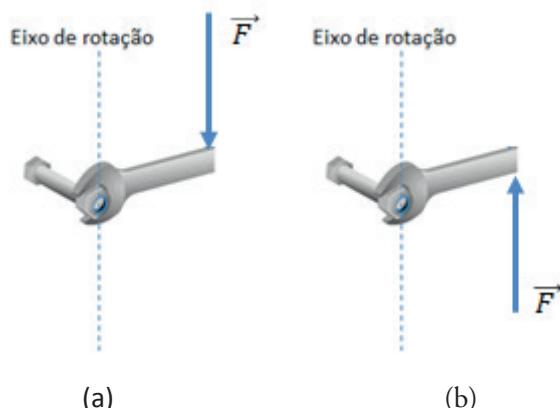


Figura 3 – Ação da força \vec{F} gerando o momento de uma força. Em (a), o momento tende girar a chave no sentido horário e, em (b), o momento da força tende a girar a chave no sentido anti-horário

Convenciona-se que o momento que faz o corpo rígido girar no sentido anti-horário é momento positivo, enquanto o momento que faz o corpo rígido girar no sentido horário é negativo.

Resumindo:

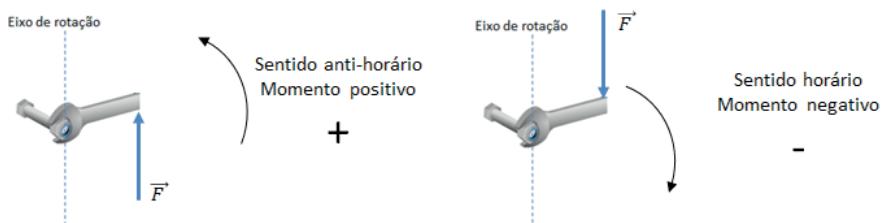


Figura 4 – Convenção de sinal do momento de uma força

11.3.3 CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO DE UM CORPO EXLENDO

Já vimos que, para um ponto material, a condição de equilíbrio é que a resultante das forças que atuam sobre ele seja nula. Quer dizer:

- Resultante das forças em x seja igual a zero, $R_x = 0$
 - Resultante das forças em y seja igual a zero, $R_y = 0$

No caso de um corpo extenso, além da resultante das forças ser igual a zero, a resultante dos momentos das forças, em relação a um ponto O, também tem que ser nula. Ou seja:

- Resultante do momento das forças atuantes, em relação a um ponto O, é igual a zero, $R_{\tau(O)} = 0$

A partir de tais condições, concluímos que o corpo não se movimenta nem na horizontal, nem na vertical, e também não pode girar.

11.3.4 CENTRO DE MASSA, CENTRO DE GRAVIDADE E CENTRO GEOMÉTRICO

Quando estudamos o equilíbrio de ponto material, não tivemos problema em definir o ponto de aplicação da força, porque levamos em conta um corpo com dimensões desprezíveis.

Contudo, ao estudarmos o equilíbrio de corpo extenso, qual é o ponto a partir do qual podemos considerar a aplicação da força-peso?

Um corpo extenso é composto por um conjunto de partículas que se distribuem por toda sua extensão, de sorte que a soma das massas dessas partículas compõe a massa total do corpo. Dessa forma, podemos identificar um ponto, em torno do qual toda a massa se encontra igualmente distribuída.

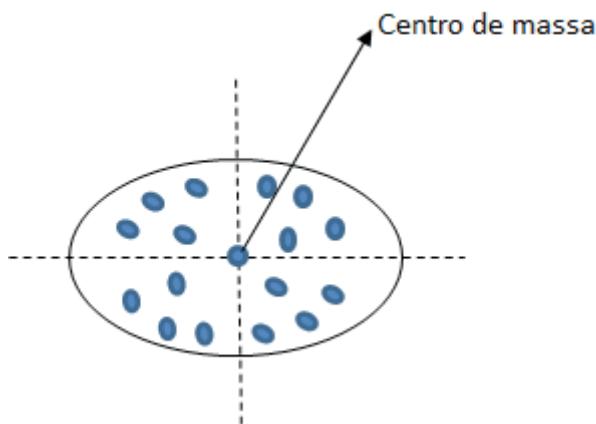


Figura 5 – Corpo de massa m distribuída uniformemente: o centro de massa coincide com o centro geométrico

Se o corpo for homogêneo, ou seja, a massa estiver igualmente distribuída por toda a extensão do corpo, o centro de massa irá coincidir com o centro geométrico desse corpo. Porém, se o corpo não for homogêneo, a massa não estará distribuída

de maneira uniforme por toda a sua extensão e, nesse caso, o centro de massa não irá coincidir com o centro geométrico.

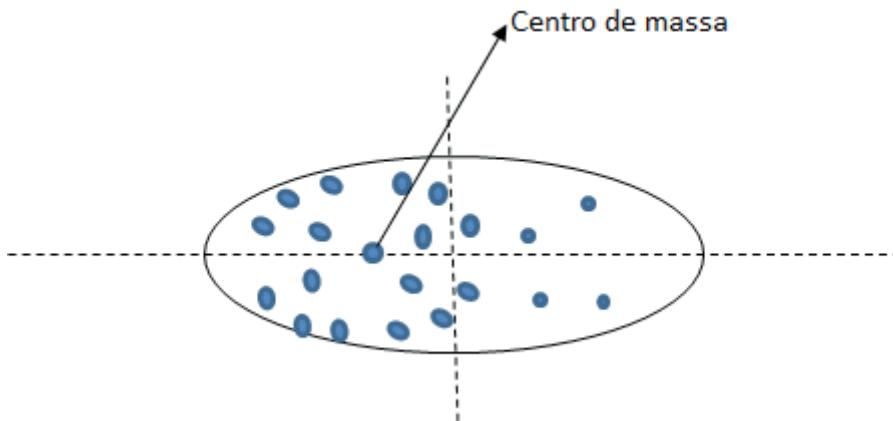


Figura 6 – Corpo de massa m distribuída não uniformemente: o centro de massa não coincide com o centro geométrico

11.3.4.1 DETERMINAÇÃO DO CENTRO DE MASSA DE UM CORPO

Para calcularmos o centro de massa de um corpo de massa M, imagine que ele seja composto por um conjunto de três partículas de massas m_1 , m_2 e m_3 , posicionadas como é mostrado na figura a seguir:

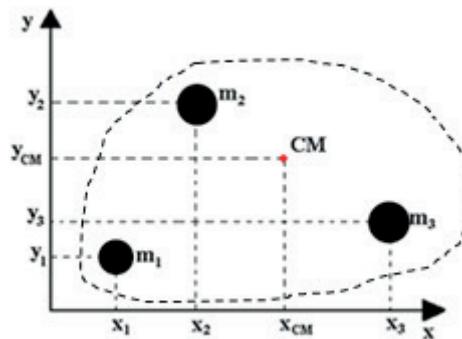


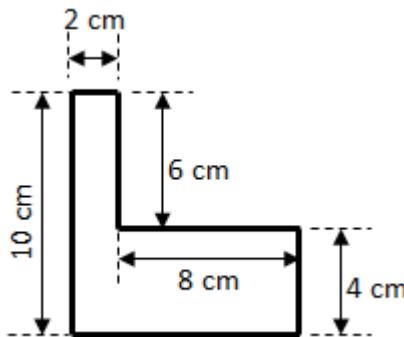
Figura 7 – Localização cartesiana das partículas e do centro de massa que compõem um corpo

Por meio de métodos matemáticos, é possível demonstrar que as coordenadas do centro de massa (CM) do corpo podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{M}$$

$$y_{CM} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3}{M}$$

Determine a localização do centro de massa da placa homogênea indicada na figura abaixo:



RESOLUÇÃO

Se o corpo é homogêneo, a massa está uniformemente distribuída por toda sua extensão. Isto é, se dividirmos a massa total (M_{total}) pela área total (A_{Total}), o valor será constante para qualquer parte do corpo. Assim, matematicamente, podemos escrever que a razão entre a massa total e a área total é igual a razão da massa de uma região do corpo (m) pela área dessa região do corpo (A):

$$\frac{M_{total}}{A_{Total}} = \frac{m}{A} = k$$

Portanto,

$$m = kA$$

$$x_C = \frac{kA_1 x_1 + kA_2 x_2}{kA_T}$$

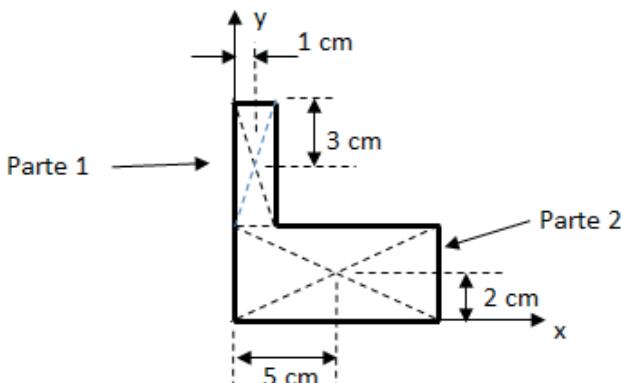
Cancelando k , temos:

$$x_C = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{A_T} \quad (I)$$

Podemos escrever o mesmo para y:

$$y_C = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{A_T} \quad (\text{II})$$

Agora, vamos dividir o corpo em dois retângulos. O centro geométrico deles será dado pela intersecção das diagonais. Logo, podemos determinar as coordenadas do centro de massa dos dois retângulos:



Dividimos o corpo em duas partes: a parte 1, que tem centro de massa localizado nas seguintes coordenadas (1, 3), e a parte 2, que tem centro de massa localizado nas seguintes coordenadas (5 e 2).

A área da parte 1, A_1 , é igual a $2.6 = 12 \text{ cm}^2$, e a área da parte 2, tem área A_2 igual a $4.10 = 40 \text{ cm}^2$. A área total do corpo será $12 + 40 = 52 \text{ cm}^2$.

Dessa maneira, substituindo os dados nas expressões I e II, temos:

$$x_C = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{A_T}$$

$$x_C = \frac{12 \cdot 1 + 40 \cdot 5}{52}$$

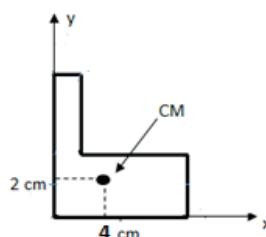
$$x_C = 4,1 \text{ cm}$$

$$y_C = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{A_T}$$

$$y_C = \frac{12 \cdot 3 + 40 \cdot 2}{52}$$

$$y_C = 2,2 \text{ cm}$$

Por conseguinte, o centro de massa do corpo como um todo terá as seguintes coordenadas: CM = (4,1; 2,2).



11.3.5 CENTRO DE GRAVIDADE DE UM CORPO

O centro de gravidade é definido como o ponto do corpo onde a força-peso é aplicada. O peso de um corpo é o produto de sua massa pelo valor da aceleração da gravidade local. Como a aceleração da gravidade se altera com a altitude, conceitualmente, temos que afirmar que nem sempre o centro de gravidade é igual ao centro de massa.

O Burj Khalifa Bin Zayid é um arranha-céu localizado em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, tem 828 m de altura e é o maior prédio já construído pelo homem. A rigor, devido a essa altura, o centro de massa não coincide com o centro de gravidade. Todavia, esse caso é uma exceção. Normalmente, o centro de massa de um corpo coincide com o seu centro de gravidade.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa

Figura 8 –Burj Khalifa Bin Zayid, o mais alto edifício do mundo

Contudo, se considerarmos que o valor da aceleração da gravidade não sofre grandes variações, ao longo do corpo, podemos admitir que o centro de gravidade é igual ao centro de massa do corpo.

11.3.6 TIPOS DE EQUILÍBRIO

Há três tipos de equilíbrio: o equilíbrio estável, o equilíbrio instável e o equilíbrio indiferente.

A diferença entre esses tipos de equilíbrio se encontra nas posições do ponto de sustentação (PS) em relação ao centro de gravidade do corpo (CG).

Dizemos que um corpo está em equilíbrio estável, quando, ao afastá-lo ligeiramente de sua posição de equilíbrio, ele retorna a ela. Um exemplo desse tipo de equilíbrio é o de um vaso dependurado: se você tentar empurrá-lo para qualquer um dos lados, tentando tirá-lo da posição de equilíbrio, ele tende a voltar para ela.



Figura 9 – Vaso em equilíbrio estável: centro de massa abaixo do ponto de sustentação

Observe a diferença de posição entre o centro de gravidade e o ponto de sustentação do corpo. Note que o centro de gravidade está abaixo do ponto de sustentação

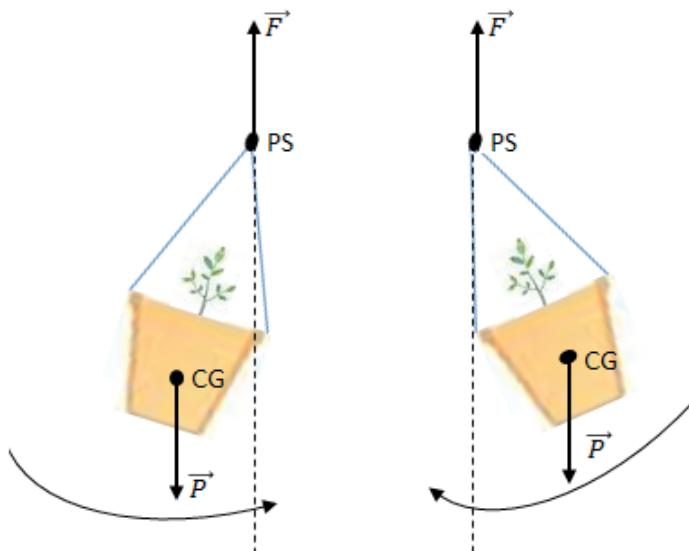


Figura 10 – Corpo em equilíbrio estável: sempre tende a voltar à posição de equilíbrio

Nesse caso, ao tentarmos tirar o corpo da posição de equilíbrio, a força peso irá gerar um momento que tenderá a trazer o corpo para sua posição de equilíbrio novamente. Por isso, podemos afirmar que todo corpo está em equilíbrio estável, quando seu centro de gravidade está abaixo do ponto de sustentação.

12 HIDROSTÁTICA

A hidrostática é uma área da Física que estuda os fluidos em equilíbrio. De forma bem simples, podemos afirmar que o fluido é constituído pela matéria num estado em que pode escoar com facilidade. Portanto, o termo *fluído* só pode ser bem aplicado aos líquidos e aos gases.

Assim, por exemplo, quando aplicamos uma força tangencial, por menor que seja, sobre um fluido, ele tende a escoar. Por isso, uma força qualquer pode produzir uma deformação nos fluidos. Os fluidos reais apresentam uma resistência à ação deformante dessa força qualquer. Essa resistência mede a viscosidade do fluido. Em nossos estudos, trataremos sempre de um fluido ideal, isto é, que não apresenta resistência ao escoamento, ou seja, cuja viscosidade é desprezível.

12.1 DENSIDADE DE UM FLUIDO

A densidade é uma propriedade específica da matéria, quer dizer, é uma característica de uma determinada substância. Essa propriedade está relacionada com a distribuição da massa ao longo do volume do corpo composto de determinada substância específica. Logo, matematicamente, podemos calcular a densidade de um fluido específico a partir da razão entre sua massa e o seu volume:

$$\textcolor{brown}{d} = \frac{\textcolor{blue}{m}}{\textcolor{violet}{v}}$$

12.1.1 UNIDADES DE DENSIDADE

A unidade de densidade, no Sistema Internacional de Unidades (SI), é o $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Tabela 1 – Valores de densidade de alguns líquidos

LÍQUIDOS	g/cm^3	kg/m^3
ACETONA	0,79	790
ÓLEO	0,92	920
ÁGUA DESTILADA	1	1.000
ÁLCOOL ETÍLICO	0,79	790
MERCÚRIO	13,6	13.600
GASOLINA	0,68	680

Fonte: www.tudosobreautomobilistica@hotmail.com

12.2 PRESSÃO NUM SÓLIDO

Podemos definir pressão num corpo sólido como a grandeza física escalar que mede a distribuição da força que atua numa dada extensão desse corpo. Matematicamente, podemos calcular a pressão P exercida por uma força \vec{F} que atua em uma dada secção de área A de um corpo sólido como sendo igual a:

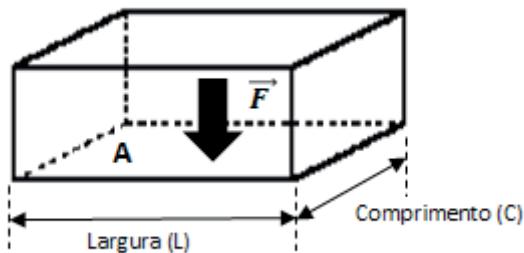


Figura 1 – Secção do corpo submetida a uma pressão P

$$P = \frac{F}{A}$$

12.2.1 UNIDADES DE PRESSÃO

A unidade de pressão, no Sistema Internacional de Unidades (SI), é o ($\frac{N}{m^2}$) ou (Pa).

12.3 PRESSÃO EM UM FLUIDO

Considere dois pontos A e B, no interior de um fluido de densidade d. Tomando como referencial a superfície livre do fluido, podemos determinar a que alturas, h_A e h_B , os pontos A e B, respectivamente, estão mergulhados.

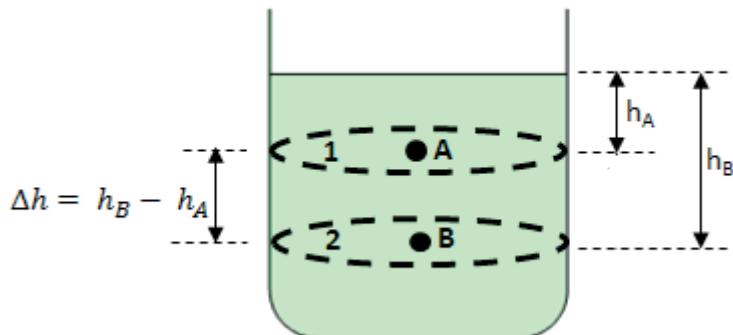


Figura 2 – Pontos A e B no interior de um fluido com densidade d

Pode-se demonstrar que a diferença de pressão sobre os pontos A e B, exercida pelos pesos das massas de fluidos sobre esses pontos, é calculada pela seguinte equação:

$$\Delta P = P_B - P_A = dg\Delta h$$

A equação é conhecida como Lei de Stevin e destaca que a pressão em um fluido em equilíbrio, com densidade constante, varia linearmente com a profundidade.

12.3.1 CONSEQUÊNCIAS DA LEI DE STEVIN

a) Todos os pontos que compõem uma mesma superfície mergulhada no fluido estão sujeitos à mesma pressão. Os físicos chamam essa superfície de isobárica (mesma pressão). Isso significa que pontos à mesma altura estão sob a mesma pressão.

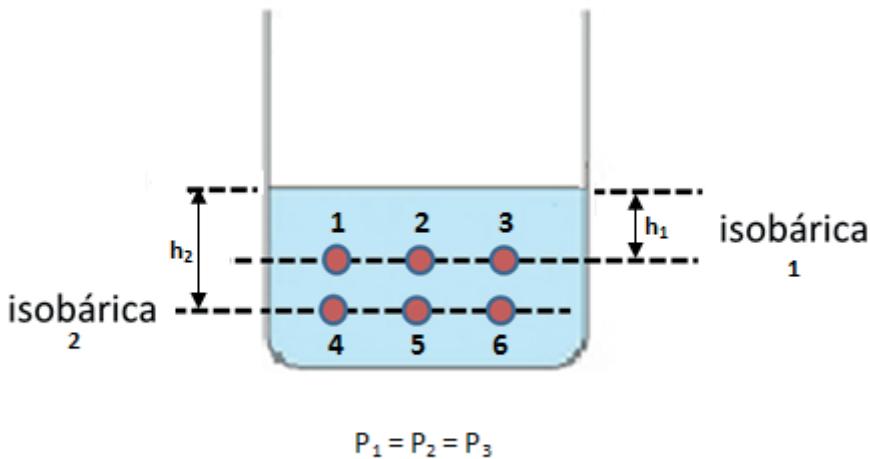


Figura 3 – Pontos isobáricos no interior de um fluido

b) Quando líquidos, por exemplo, A e B, não miscíveis, são colocados em vasos comunicantes, as suas alturas em relação às superfícies de separação e à extremidade livre são inversamente proporcionais às suas densidades.

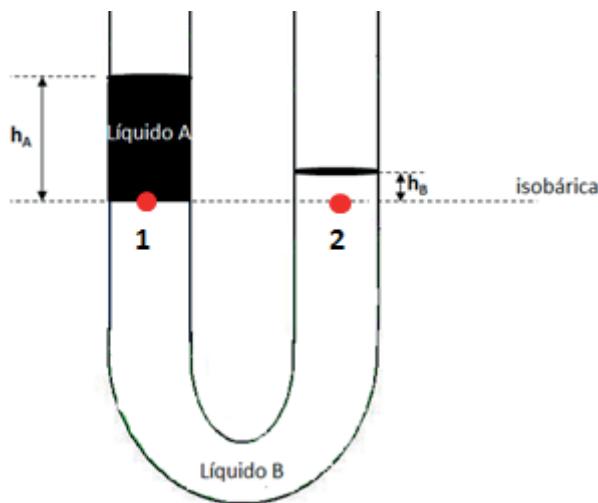


Figura 4 – Líquidos imiscíveis no interior de um vaso comunicante

Note que, na isobárica, $P_1 = P_2$, portanto, utilizando a Lei de Stevin, temos:

$$P_1 = P_2$$

$$d_A g h_A = d_B g h_B$$

$$\frac{d_A}{d_B} = \frac{h_B}{h_A}$$

- c) No caso da mistura de gases que compõem a atmosfera, a Lei de Stevin, como descrita na equação, é válida se levarmos em conta desprezíveis variações na densidade do ar e na aceleração da gravidade com a altitude.

12.4 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Considere o planeta Terra envolto por uma camada de ar, ou seja, por uma mistura de gases. Essa camada gasosa é denominada atmosfera. Dessa forma, todos nós, que neste planeta vivemos, estamos mergulhados em um fluido e, portanto, sujeitos à ação da pressão atmosférica.

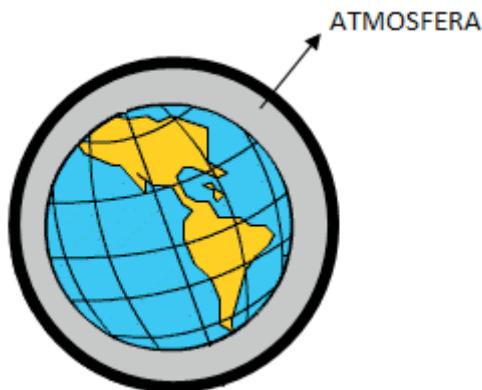


Figura 5 – Camada atmosférica envolvendo o planeta Terra

Qual a intensidade da pressão atmosférica?

Uma experiência famosa, realizada por Evangelista Torricelli, em 1643, permitiu a determinação da intensidade da pressão atmosférica.

Usando um tubo de vidro, completamente cheio de mercúrio e de uma cuba, também de vidro e também contendo mercúrio, Torricelli emborcou o tubo na cuba e observou a altura de coluna líquida de mercúrio que se estabelecia no tubo. Esse aparato, o qual serve para medir a intensidade da pressão atmosférica, foi chamado de barômetro de Torricelli.

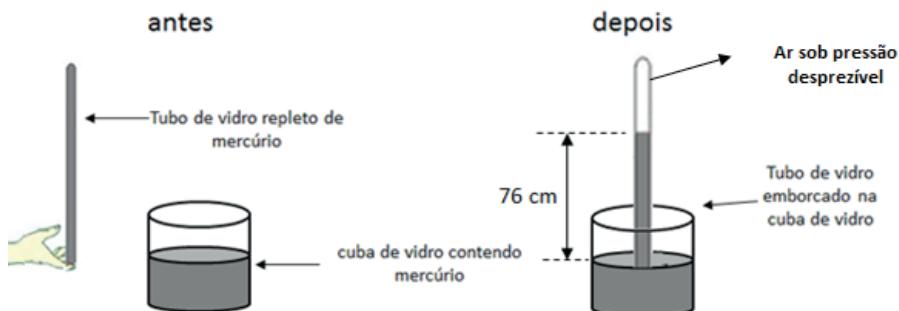


Figura 6 – Experiência de Torricelli

Torricelli confirmou as conclusões de Stevin, quer dizer, quanto mais mergulhado estamos no interior do fluido atmosférico, maior é a intensidade da pressão que a atmosfera exerce sobre nós. Assim, na superfície terrestre, no nível do mar, a

pressão atmosférica é máxima e chega a equilibrar a pressão exercida pelo peso de uma coluna de mercúrio de 76 cm de altura.

12.4.1 UNIDADE DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Por causa da experiência de Torricelli, é bastante comum se referir à intensidade da pressão atmosférica, comparando sua intensidade com a altura da coluna de mercúrio que é capaz de sustentar. Por conseguinte, apesar de não ser adequado utilizar a unidade de comprimento como unidade de pressão, é comum o uso das unidades cmHg (centímetros de mercúrio) e/ou mmHg (milímetros de mercúrio) para referir-se à pressão.

Por isso, sabemos que, no nível do mar, a pressão atmosférica consegue equilibrar a pressão exercida pelo peso da coluna líquida de mercúrio de 76 cm de altura, ou seja, vale 76 cmHg ou 760 mmHg.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), temos:

Admitindo a densidade do mercúrio igual a 13600 kg/m^3 e a aceleração da gravidade constante, para qualquer altitude, igual a 10m/s^2 , temos:

$$P_{atm} = dg\Delta h$$

$$P_{atm} = 1,310^{4 \cdot 10.76 \times 10^{-2}}$$

$$P_{atm} \cong 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

12.4.2 MEDIDORES DE PRESSÃO

Os manômetros são aparelhos empregados para medir a pressão exercida por um fluido. Basicamente, eles podem ser de dois tipos:

- Manômetros de tubo aberto; e
- Manômetros de tubo fechado.

Nos manômetros de tubo aberto, você deve considerar a pressão atmosférica, enquanto, em manômetros de tubo fechado, a pressão atmosférica não é levada em conta. Para entendermos melhor o funcionamento desses dois tipos de manômetros, pense em um recipiente contendo um fluido. Para medir a pressão exercida por ele, utilizamos um manômetro: de tubo aberto ou fechado.

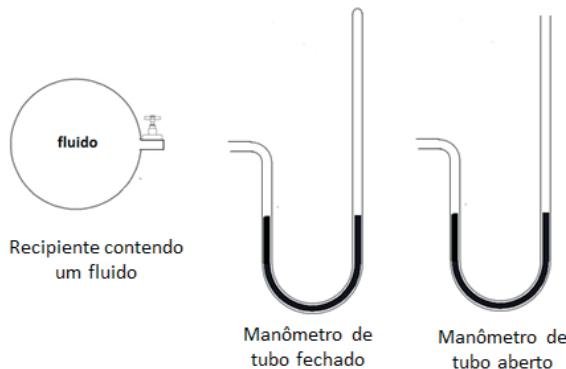


Figura 7 – Manômetros de tubo aberto e de tubo fechado

Ao ligarmos os manômetros no recipiente e abrirmos o registro do recipiente contendo o fluido, observaremos um deslocamento no nível do fluido de densidade d dentro do manômetro. Nesse caso, a medida da pressão do fluido dentro do recipiente é realizada como mostramos na figura a seguir:

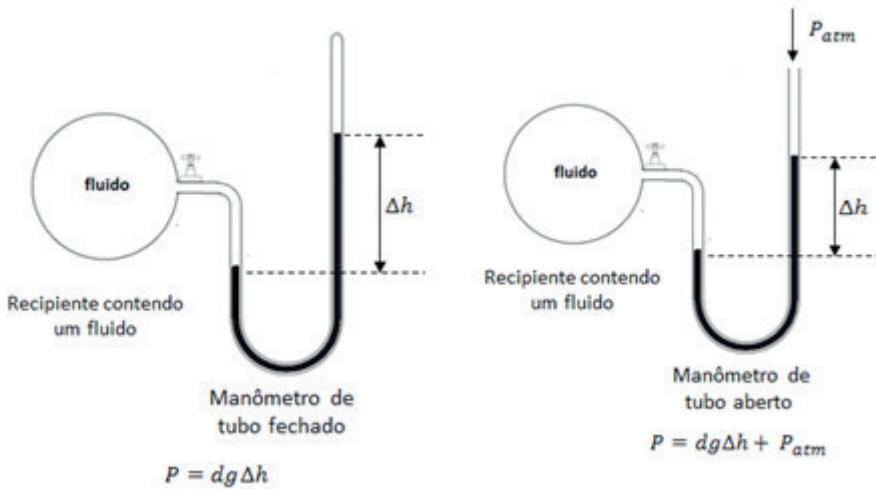


Figura 8 – Medidas de pressão com manômetro de tubo aberto e com manômetro tubo fechado

12.5 PRINCÍPIO DE PASCAL

Pascal afirma que, se houver uma variação de pressão em um elemento de área no interior de um fluido em equilíbrio e incompressível, ela se transmitirá integralmente a todos os outros demais elementos de área do fluido. Isso quer dizer que, se considerarmos dois pontos, A e B, no interior de um líquido em equilíbrio e incompres-

sível, em diferentes alturas, sendo $h_B > h_A$, e que haja uma variação de pressão ΔP no ponto A, então, a pressão no Ponto B será:

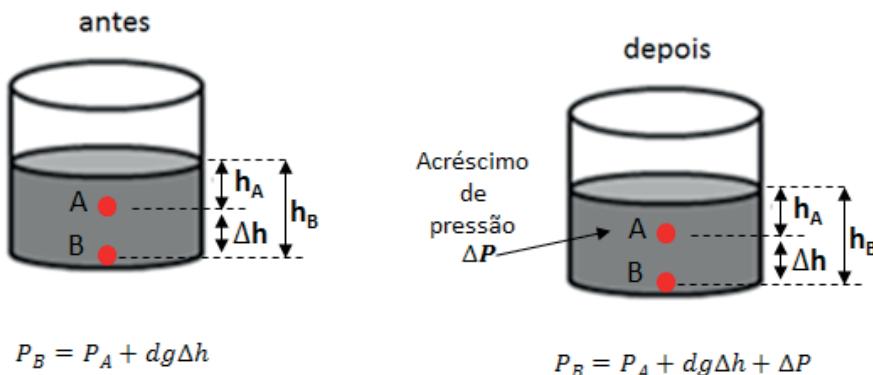
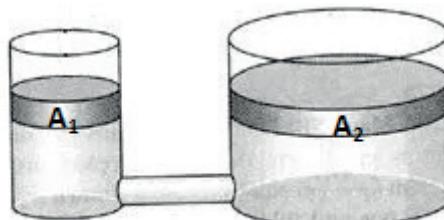


Figura 9 – Princípio de Pascal

Uma aplicação do Princípio de Pascal é relacionada com o funcionamento de um macaco, prensa e/ou freio hidráulico.

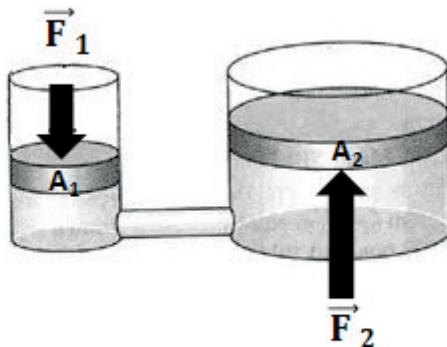
Basicamente, qualquer um desses equipamentos se constitui de um sistema de vasos comunicantes com secções diferentes. Na figura a seguir, apresentamos um esquema no qual vasos comunicantes apresentam secções de áreas diferentes, A_1 e A_2 , sendo $A_1 < A_2$, contendo êmbolos que deslizam pelo interior dos vasos, sem causar atrito.



Fonte: www.colegioweb.com.br

Figura 10 – Vasos comunicantes de secções com áreas diferentes

Se aplicarmos uma força \vec{F}_1 sobre o êmbolo de área A_1 , geramos uma pressão P que, segundo o Princípio de Pascal, será transmitida integralmente por todo o fluido no interior dos vasos comunicantes.



Fonte: www.colegioweb.com.br

Figura 11 – Ação de forças sobre êmbolos de diferentes áreas em vasos comunicantes de secções com áreas diferentes

No êmbolo 1, a pressão, P, pode ser calculada pela equação:

$$P = \frac{F_1}{A_1}$$

No êmbolo 2, a pressão, P, pode ser calculada pela equação:

$$P = \frac{F_2}{A_2}$$

Com $P = P$, então, podemos escrever:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Como $A_1 < A_2$, segundo a equação V, podemos concluir que $F_2 > F_1$, assim, num mecanismo desses, podemos multiplicar forças a partir das diferenças de áreas.

Todavia, note que o que se ganha em força se perde em deslocamento: o êmbolo de área A_1 se desloca mais do que o êmbolo de área A_2 . Isso acontece porque, como o fluido é incompressível, todo o volume deslocado de fluido pelo êmbolo de área A_1 será o que deslocará o êmbolo de área A_2 . Por conseguinte, como o volume se conserva, temos que, enquanto o êmbolo de área A_1 se desloca x_1 , o êmbolo de área A_2 se desloca x_2 :

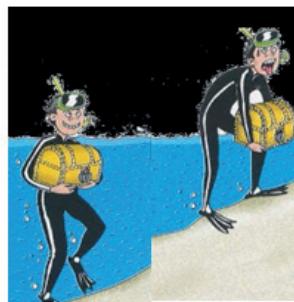
$$V_{deslocado\ em\ 1} = V_{deslocado\ em\ 2}$$

$$A_1 x_1 = A_2 x_2$$

$$x_2 = \frac{A_1}{A_2} x_1$$

12.6 PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

Você já observou que, quando um corpo está totalmente submerso em água, seu peso parece ser menor do que seu peso fora da água?



Fonte: <http://querespuesta.com/adaptado>

Figura 12 – Peso aparente

Pois é! Quando o corpo está submerso, dizemos que ele possui um peso aparente (\vec{P}_{ap}) e, quando o corpo está fora da água, ele apresenta seu peso real (\vec{P}_R).

Essa diferença de peso ocorre por causa de uma força, denominada Empuxo (\vec{E}), a qual surge quando um corpo é mergulhado em um fluido.

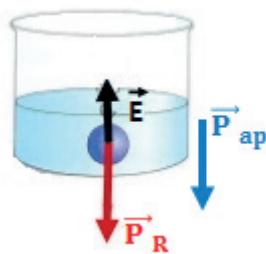


Figura 13 – Empuxo

Nesse caso, a intensidade do peso aparente, \vec{P}_{ap} , será:

$$P_{ap} = P_R - E$$

O empuxo surge por causa da diferença de pressão estabelecida sobre o corpo submerso.

Veja que, como a pressão aumenta à medida que se aprofunda no líquido, a pressão exercida pelo líquido na parte superior do corpo é menor do que a exercida em sua parte inferior. Uma força resultante de cima para baixo age sobre o corpo submerso. Essa força é denominada Empuxo \vec{E} . O Princípio de Arquimedes afirma que o Empuxo é uma força de intensidade igual ao peso do volume de fluido deslocado, quando um corpo fosse colocado em seu interior. O módulo do empuxo pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$E = dVg$$

13 ONDULATÓRIA

13.1 INTRODUÇÃO

A energia, como já vimos, apresenta-se de diferentes formas na natureza: mecânica, térmica, eletromagnética etc. Todavia, como ela se propaga pelo espaço?

Para responder a essa questão, os físicos criaram um modelo que resolvem chamar de onda. Ao se propagar pelo espaço, a energia é transportada por uma onda. Mas o que é uma onda?

13.2 ONDAS MECÂNICAS E ELETROMAGNÉTICAS

Onda é a perturbação a partir da qual há transportes de energia pelo espaço (tri, bi ou unidimensional). Elas podem ser classificadas, basicamente, em mecânicas e eletromagnéticas.

Uma onda mecânica é aquela que transporta energia através de um meio material. É importante não confundir: uma onda transporta energia e não matéria, porém, pode propagar-se através dela.

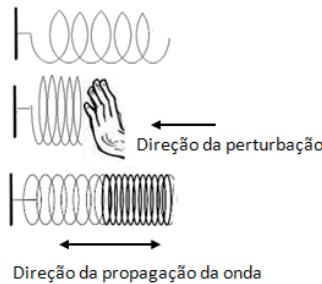
Ondas mecânicas podem ser propagar através de qualquer meio material que possa ser considerado elástico (que se deformar com certa facilidade), como, por exemplo, o ar, a água, uma corda, uma mola etc.

No caso das ondas eletromagnéticas, elas podem transportar energia sem que exista nenhum meio material, isto é, elas podem propagar-se no vácuo. Um exemplo é a luz emitida pelo Sol que chega até nós percorrendo longas distâncias no vácuo.

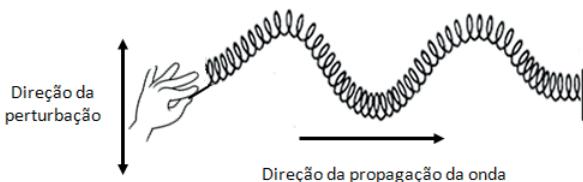
13.2.1 ONDAS LONGITUDINAIS E ONDAS TRANSVERSAIS

Dependendo do modo como uma onda se propaga em relação à maneira como a perturbação foi produzida, podemos classificá-la em longitudinais e transversais.

Uma onda longitudinal se propaga numa direção igual àquela na qual a perturbação foi produzida.



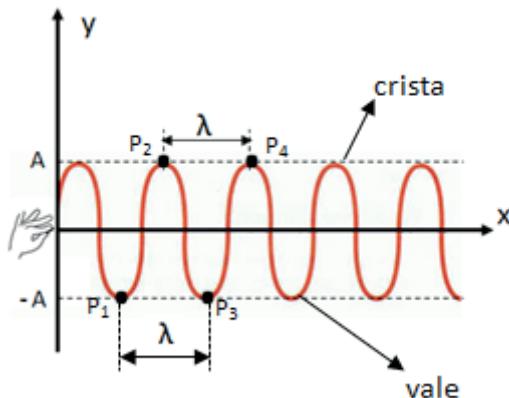
Uma onda transversal se propaga numa direção perpendicular (forma um ângulo de 90°) em relação àquela na qual a perturbação foi produzida.



13.2.2 GRANDEZAS A SEREM CONSIDERADAS NO ESTUDO DE UMA Onda

Considere uma onda transversal gerada por uma fonte oscilante, constante, a qual repete periodicamente a mesma perturbação em uma corda.

Se, na posição de repouso da corda, definirmos o sistema de referência, identificamos valores máximos e mínimos no eixo das coordenadas, que denominamos amplitude da onda (A).



O comprimento de onda pode ser definido como a distância de crista a crista, ou de vale a vale, ou entre quaisquer outros pontos que estejam em fase, ou seja, pontos cujo sentido da oscilação seja o mesmo (P_1 e P_3) e (P_2 e P_4). No SI, a unidade de comprimento de onda e de amplitude é o metro.

O tempo necessário para que cada onda se complete, quer dizer, para que cada uma das oscilações ocorra completamente, é definido como sendo o período T da onda. A frequência é o número de oscilações que acontecem na unidade de tempo. Assim, temos:

Tempo	nº de oscilações completas
T	----- 1
1	----- f

Logo, pode-se concluir matematicamente que

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

No SI, a unidade de período T é o segundo (s) e a unidade de frequência é s^{-1} ou hertz (Hz).

Com base nas grandezas período, frequência e comprimento de onda, matematicamente, podemos determinar a velocidade de propagação da onda pela equação:

$$v = \frac{\lambda}{T} \rightarrow v = \lambda f$$

A unidade de velocidade de propagação é expressa, no SI, em m/s.

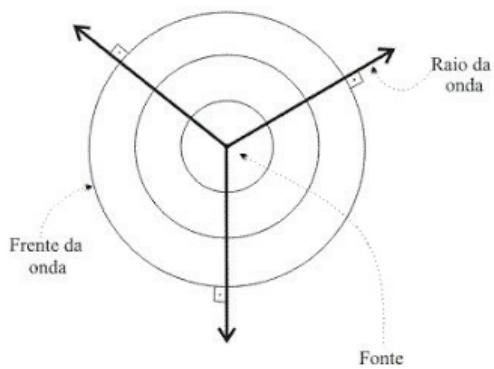
13.2.3 RAIOS E FRENTE DE ONDAS BIDIMENSIONAIS E TRIDIMENSIONAIS

Até agora, destacamos exemplos de ondas unidimensionais, ou seja, que se propagam em uma única dimensão. Contudo, existem ondas que se propagam no plano (bidimensionais) ou no espaço (tridimensionais).

Um exemplo de ondas bidimensionais que pode ser citado é o caso de uma pedra que atinge a superfície de um rio. Imediatamente, notamos ondas que se propagam por toda a superfície. A representação esquemática dessas ondas pode ser feita por meio de círculos concêntricos, os quais ilustram a região do espaço que a onda alcança, ou por linhas horizontais paralelas. Essa representação é denominada frente de onda. O raio de onda serve para indicar a direção de propagação da onda.



Fonte: <http://blog.teophilo.info.com>



Fonte: <http://grupo4-3d.blogspot.com.br/>

Figura 1 – Onda bidimensional

As ondas sonoras, assim como as luminosas são tridimensionais, pois se propagam por todas as três dimensões do espaço. Nesse caso, sua representação não é feita por círculos, mas por esferas.



Fonte: <http://moodle.ufsc.br>

Figura 2 – Onda tridimensional

13.2.4 REFRAÇÃO, INTERFERÊNCIA E REFLEXÃO EM ONDAS UNIDIMENSIONAIS.

a) Ondas e mudança de meio de propagação

Para analisarmos o comportamento de uma onda, quando esta encontra uma mudança nas características do meio em que se propaga, imagine uma corda fina e esticada unida a outra também esticada, só que mais grossa.



Figura 3 – Corda fina, esticada unida a outra, também esticada, porém mais grossa

Agora, imagine uma fonte oscilante constante, agindo na extremidade livre da corda fina.

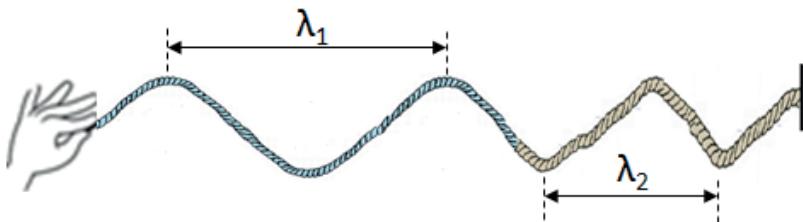


Figura 4 – Mudança de meio na propagação de ondas

Experimentalmente, verifica-se que a frequência de oscilação não se altera, tendo em vista que esta depende da fonte oscilante. Contudo, o comprimento de onda se altera.

Assim, pode-se concluir que, ao mudar de meio, uma onda não altera sua frequência, mas muda seu comprimento de onda.

Levando em conta a equação de definição de velocidade de onda, quando há mudança de meio de propagação, a velocidade da onda também se altera.

No exemplo proposto, é possível observar que a onda, ao se propagar pela corda grossa, apresenta um comprimento de onda menor e, consequentemente, uma velocidade de propagação também menor.

Nesse sentido, pode-se concluir que a densidade linear da corda (μ), ou seja, como sua massa está distribuída ao longo de seu comprimento, interfere na velocidade de ondas que se propagam por elas.

Considerando a massa da corda como sendo m e o comprimento da corda como l , então, matematicamente, podemos escrever que:

$$\mu = \frac{m}{l}$$

Pode-se demonstrar matematicamente que a relação entre velocidade de propagação de ondas em cordas (v) e a densidade linear dessas cordas (μ) é dada pela equação:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

F é o módulo da tensão na corda.

No SI, a unidade de densidade linear de uma corda é expressa em $\frac{kg}{m}$

b) Superposição de ondas ou interferência

A superposição de ondas ou interferência é o fenômeno ondulatório que ocorre quando duas ou mais ondas se encontram.

Vamos analisar esse fenômeno estudando, primeiro, as ondas unidimensionais, numa corda ou fio. Consideremos, dessa forma, um fio, inicialmente esticado, nas extremidades dos quais duas ondas de mesma largura e amplitudes diferentes são produzidas, de tal forma que uma se propague no sentido contrário da outra.



Figura 5 –Ondas de mesma largura, amplitudes diferentes que se propagam em sentidos contrários

Quando um pulso se encontra com o outro, temos a superposição e, nesse ponto, as amplitudes se somam, gerando um pulso resultante com amplitude A_3 , sendo

$$A_3 = A_1 + A_2$$

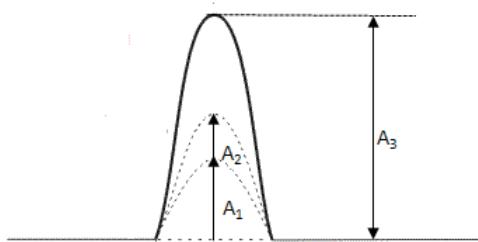


Figura 6 –Interferência construtiva

Esse caso é chamado de interferência construtiva.

Após o cruzamento, os pulsos retomam suas características anteriores ao encontro.



Figura 7 – Ondas após a interferência

Agora, vamos imaginar a situação na qual os pulsos que se encontram em fase invertida.

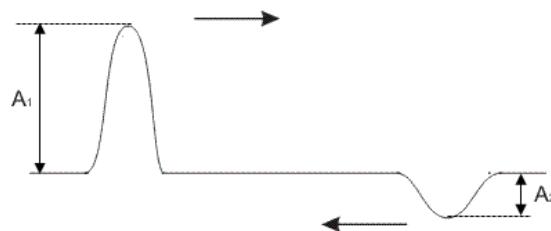


Figura 8 – Ondas de fase invertida

No momento da sobreposição, as amplitudes serão somadas, porém, como A_2 é negativo, temos:

$$A_3 = A_1 - A_2$$

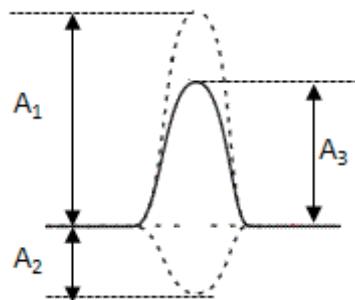


Figura 9 – Interferência destrutiva

Esse caso é chamado de interferência destrutiva.

Após o cruzamento, os pulsos retomam suas características anteriores ao encontro.

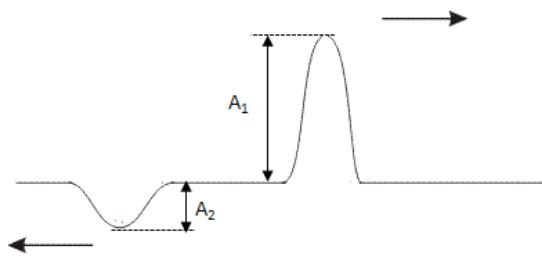


Figura 10 – Ondas após a interferência

c) Ondas estacionárias

Considere ondas que se propagam por uma corda cujas extremidades estão presas: uma, numa fonte vibratória, e outra, numa parede. Quando as ondas produzidas pela fonte encontram a parede, refletem e voltam em sentido oposto. Dessa maneira, haverá uma superposição de ondas planas de mesma frequência (f), as quais se propagam na mesma direção, porém, em sentidos contrários, tendo em vista as ondas que serão refletidas. O resultado dessa superposição é chamado de ondas estacionárias.

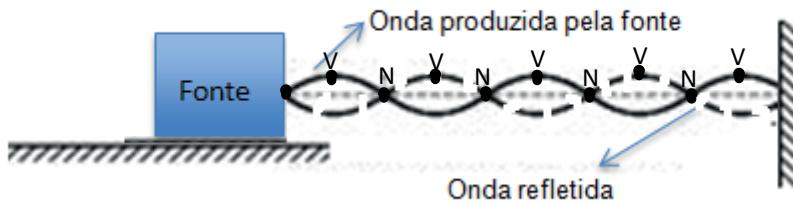


Figura 11 – Ondas estacionárias

Note os pontos N e V. Eles são chamados, respectivamente, de nós e ventres. Os ventres correspondem aos pontos da corda onde a oscilação é máxima. Os nós, por sua vez, indicam os pontos onde a oscilação é mínima.

Dependendo do valor da força (F) com que a corda é tracionada (muito ou pouco esticada), o número de ventres e de nós pode aumentar ou diminuir.

Esse fenômeno pode ser explicado a partir do conceito de ressonância. Para entendermos melhor esse conceito, é preciso que se compreenda antes o significado de frequência natural de vibração dos corpos.

Todo corpo material, em função de suas características físicas (dependendo da maneira com que foi construído), tem uma tendência natural de vibrar numa determinada frequência específica, a qual recebe o nome de frequência natural de vibração. Cada corda de um violão, por exemplo, tem uma frequência natural de vibração, por isso, elas emitem sons diferentes.

Se a frequência natural de vibração de um corpo for igual à frequência de oscilação da fonte que atue sobre ele, a amplitude de oscilação será aumentada cada vez mais. Esse fenômeno é chamado de ressonância.

No caso de nossa experiência, a frequência da fonte vibratória (f) é constante, mas há um conjunto de frequências naturais que a corda pode assumir, à medida que aumentamos a força de tração sobre ela.

O valor da frequência natural que a corda, presa em ambas as extremidades, pode assumir é dado pela expressão:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

onde n é um número inteiro ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$), l é o comprimento da corda, F é a intensidade da força de tração na corda e μ é a densidade linear da corda. Para $n = 1$, temos f_1 , que é chamada de frequência fundamental, a qual gera uma onda estacionária de um só ventre.

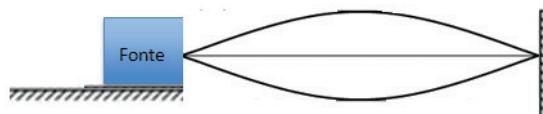


Figura 12 – Onda estacionária de um só ventre

13.2.5 REFRAÇÃO, REFLEXÃO E INTERFERÊNCIA EM ONDAS BIDIMENSIONAIS

a) Refração de ondas bidimensionais

Considere uma onda bidimensional de comprimento de onda igual a λ_1 , propagando-se num meio 1, com velocidade v_1 . Ao incidir sobre uma superfície de separação, entre os meios 1 e 2, com ângulo θ_1 , a onda refrata, isto é, atravessa a su-

perfície de separação e, ao se propagar no meio 2, passa a ter outra direção, θ_2 (ângulo de refração), e uma outra velocidade de propagação, v_2 .

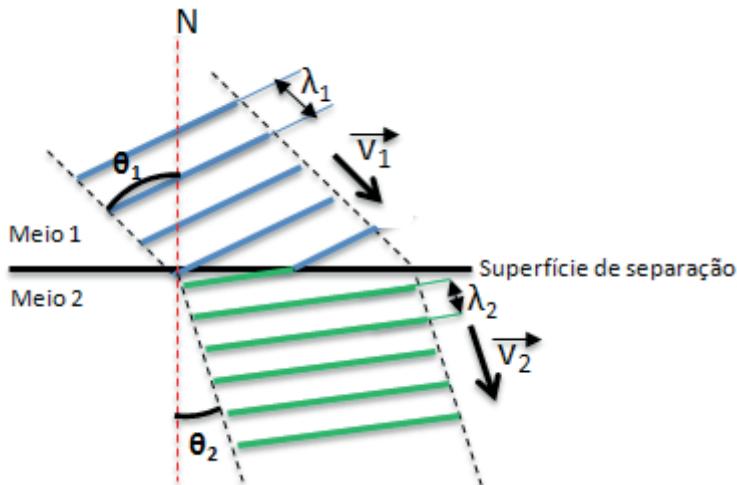


Figura 13 – refração de ondas

Veja que a onda se “entorta”, ou seja, sofre uma refração, um desvio, ao mudar do meio 1 para o meio 2.

Matematicamente, podemos escrever:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Também podemos escrever:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

b) Reflexão de ondas bidimensionais

Considere uma onda bidimensional que se propaga num determinado meio x com uma velocidade de módulo v e que incide sobre um obstáculo, formando, com uma linha perpendicular à superfície desse obstáculo (N), um ângulo igual a θ_1 . Ocorre reflexão, se a onda que incide sobre um obstáculo retorna ao meio de propagação e continua com as mesmas características da onda incidente.

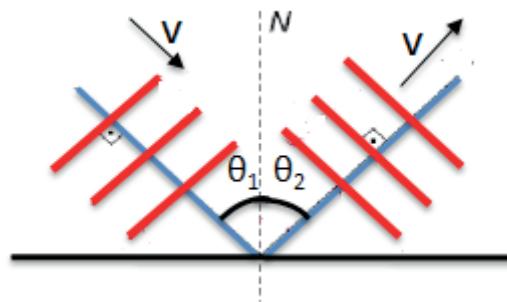


Figura 14 – reflexão de ondas

Assim,

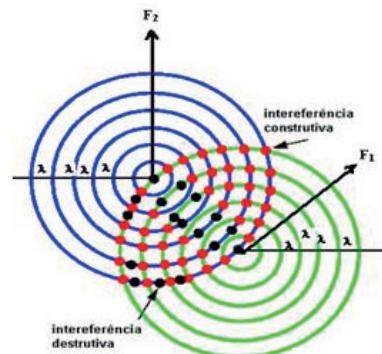
$$\theta_1 = \theta_2$$

c) Interferência de ondas bidimensionais

Em caso de superposição de ondas unidimensionais, já estudamos que o encontro de duas cristas gera a soma algébrica de suas amplitudes (interferência construtiva) e o encontro de um vale de uma onda com a crista de outra gera a subtração algébrica das amplitudes (interferência destrutiva). O mesmo acontece com as ondas bidimensionais. Na figura a seguir, duas ondas bidimensionais são geradas pelas fontes F_1 e F_2 , as quais vibram, ambas, na mesma frequência.



Fonte: <http://www.infoescola.com>



Fonte: <http://www.fisicavestibular.com>

Figura 15 – Interferência de ondas

Os pontos vermelhos evidenciam a superposição de duas cristas (interferência construtiva). Os pontos pretos indicam a superposição de um vale com uma crista (interferência destrutiva).

13.2.6 DIFRAÇÃO DE ONDAS

Um fenômeno tipicamente ondulatório é a difração, quer dizer, a tendência da onda em contornar um obstáculo.

O Princípio de Huygens afirma que cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado fonte pontual que gera frentes de ondas secundárias, propagando-se em diferentes direções com a mesma frequência e mesma velocidade das ondas primárias.

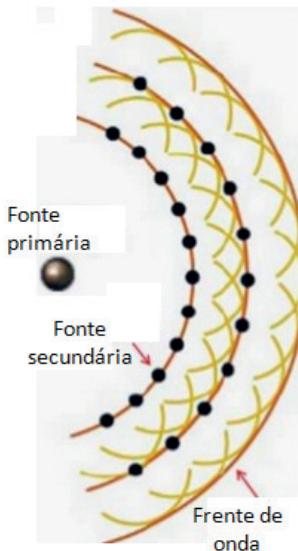


Figura 16 – Princípio de Huygens

Assim, se levarmos em conta os pontos das ondas próximos das paredes de quaisquer obstáculos como fontes secundárias de novas frentes de ondas, podemos compreender a facilidade com que as ondas contornam obstáculos.

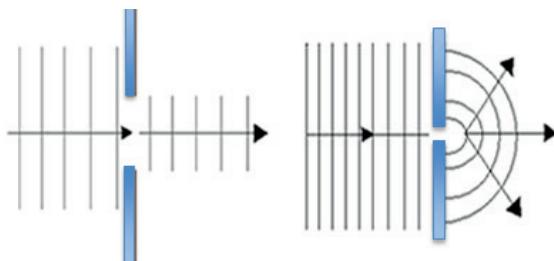


Figura 17 – Difração de ondas

Note, pela figura, que a difração será mais bem percebida, quanto maior for o comprimento de onda em relação ao tamanho do obstáculo que a onda precisa contornar, ou seja, o fenômeno da difração é mais intenso, quando os obstáculos a serem contornados são pequenos, se comparados ao comprimento das ondas que os contornam.

14 TERMOLÓGIA

Neste capítulo, iniciamos o estudo da termologia, ou seja, a parte da Física que estuda a natureza do calor e seus efeitos. Assim, começaremos estabelecendo a diferença entre temperatura e calor.

Enquanto o calor é uma forma de energia, a temperatura é uma grandeza escalar relacionada com o grau de agitação térmica das partículas que compõem um corpo ou um meio material.

Assim, a temperatura é um efeito do calor. Em capítulos posteriores, trataremos mais detalhadamente da questão do calor. Por ora, vamos nos concentrar na definição de temperatura.

A ideia de temperatura está associada às sensações de frio e quente. Contudo, essas sensações não são critérios bem definidos para se determinar com precisão a temperatura de um corpo. Por isso, os termômetros, aparelhos que permitem a determinação da temperatura de um corpo ou meio material, foram construídos.

Basicamente, um termômetro constitui-se de uma substância com propriedade termométrica com comportamento bem definido: de forma geral, pode-se afirmar que determinadas substâncias, quando aquecidas ou resfriadas, apresentam uma variação no volume que ocupam (dilatam-se ou contraem-se).

A observação desse efeito possibilitou a construção de instrumentos para a medição da temperatura dos corpos: os termômetros.

14.1 OS TERMÔMETROS

Foram construídos diferentes tipos de termômetros, tanto com respeito ao seu formato e construção quanto em relação às substâncias utilizadas que poderiam estar no estado líquido (alcool ou mercúrio); gasoso (hélio) ou sólido (bimetálicos); há também os digitais, os de radiação etc.

Os mais comuns são aqueles de mercúrio, constituídos de um tubo de vidro muito fino (capilar) com mercúrio que se dilata ou se contrai, à medida que a temperatura varia.



Fonte: <http://www.portaldoprofessor.mec.gov.br>

Figura 1 – Termômetro de mercúrio

Assim, associa-se uma escolha de altura alcançada pelo mercúrio com a temperatura a que foi submetido o termômetro.

14.2 ESCALAS TERMOMÉTRICAS

Foram muitas as escalas propostas, entretanto, as mais usuais atualmente são a Celsius ($^{\circ}\text{C}$), a Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) e a Kelvin (K). Celsius e Fahrenheit atribuem números diferentes para as temperaturas-referência, o ponto de fusão e a ebulição da água. Kelvin, por sua vez, parte da ideia de zero absoluto. Assim, as escalas termométricas podem ser comparadas no esquema a seguir:

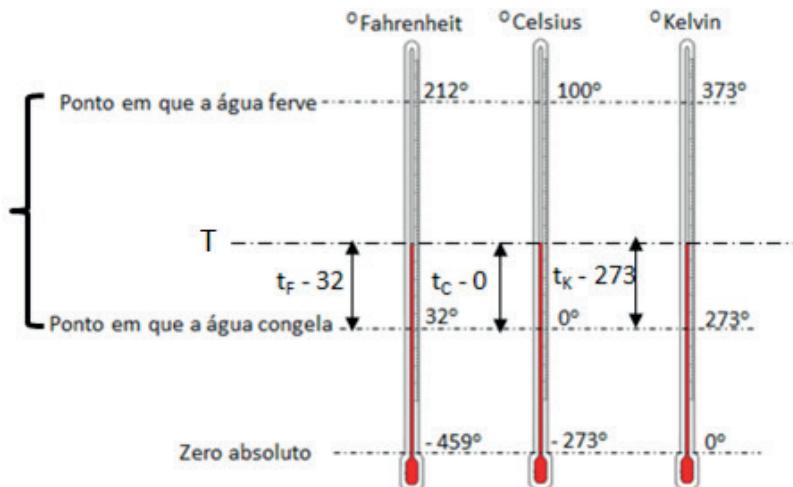


Figura 2 – Escalas termométricas

Para fazermos a conversão de unidades entre as diferentes escalas termométricas, temos:

$$\frac{T_F - 32}{212 - 32} = \frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_K - 273}{373 - 273}$$

Simplificando:

$$\frac{T_F - 32}{9} = \frac{T_C}{5} = \frac{T_K - 273}{5}$$

Portanto:

$$\frac{T_F - 32}{9} = \frac{T_C}{5}$$

E

$$T_C = T_K - 273$$

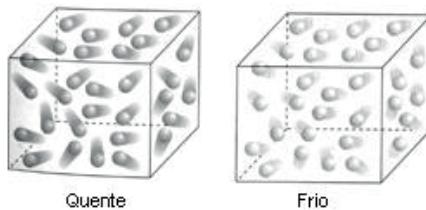
Para que um termômetro possa nos oferecer uma medida segura, é fundamental que o coloquemos em contato com o corpo cuja temperatura desejamos conhecer e aguardemos um certo tempo, para que ocorra o equilíbrio térmico.

Diz-se que dois ou mais corpos estão em equilíbrio térmico, quando suas temperaturas se igualam, após certo tempo, tendo em vista a transferência de calor que ocorre do corpo mais quente para o mais frio. Entraremos em maiores detalhes sobre esse processo em capítulos posteriores.

14.3 DILATAÇÃO TÉRMICA

Como vimos no estudo dos termômetros, as substâncias tendem a alterar o volume que ocupam, a partir da variação da temperatura. Por que isso acontece?

A temperatura, além de estar relacionada à sensação de quente e frio, pode ser associada ao grau de agitação das partículas que compõem um corpo.



Fonte: <http://minhasaulasdefisica.blogspot.com.br/>

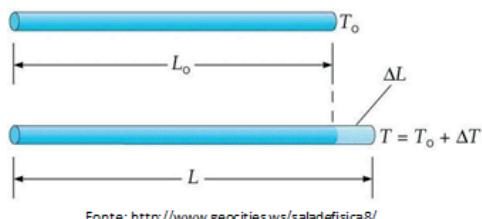
Figura 3 – Quando aumentamos a temperatura de um corpo, também aumentamos a agitação térmica das partículas deste corpo

É possível notar que, quanto mais quente, ou seja, quanto maior é a temperatura, maior é a agitação das partículas que compõem um corpo. Ao contrário, quanto mais frio, menor a temperatura e menor é a agitação das partículas que o constituem.

Quanto mais agitadas as partículas, mais amplamente elas oscilam em torno do ponto de equilíbrio, isto é, afastam-se umas das outras, de forma que os corpos tendem a aumentar suas dimensões.

a) Dilatação linear: é a dilatação na qual consideramos apenas o aumento de uma única dimensão do corpo, levando em conta que as outras são desprezíveis. É o caso de barras bem finas e fios.

Nesse caso, considere uma barra de diâmetro desprezível, com comprimento inicial L_0 com temperatura inicial T_0 , que é aquecida até uma temperatura T_1 , passando a apresentar um comprimento L_1 .



Fonte: <http://www.geocities.ws/saladefisica8/>

Figura 4 – Dilatação linear

Experimentalmente, pode-se observar que a dilatação $\Delta L = L_1 - L_0$, correspondente ao intervalo de temperatura $\Delta T = T_1 - T_0$, é proporcional ao comprimento inicial L_0 da barra e também à ΔT . Ou seja:

$$\Delta L \sim L_0 \Delta t$$

Para transformar essa proporção em igualdade, é preciso definir uma constante de igualdade que é denominada coeficiente de dilatação linear (α) .

Portanto:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta t$$

Ou:

$$L_1 = L_0 + \alpha L_0 \Delta t$$

O coeficiente de dilatação linear é uma característica do material de que é feito a barra dilatada, e sua unidade é dada em função da unidade de temperatura. Por exemplo, se a temperatura for dada em ° Celsius, então a unidade de α é $^{\circ}C^{-1}$

A seguir, apresentamos uma tabela com valores de α para diferentes substâncias.

Tabela 1 - Coeficientes de dilatação linear de diferentes substâncias

Material	Coeficiente de dilatação linear (α) em $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Aço	$1,1 \times 10^{-5}$
Alumínio	$2,4 \times 10^{-5}$
Chumbo	$2,9 \times 10^{-5}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-5}$
Ferro	$1,2 \times 10^{-5}$
Concreto	$1,0 \times 10^{-5}$
Latão	$2,0 \times 10^{-5}$
Ouro	$1,4 \times 10^{-5}$
Prata	$1,9 \times 10^{-5}$
Vidro comum	$0,9 \times 10^{-5}$
Vidro pirex	$0,3 \times 10^{-5}$
Zinco	$6,4 \times 10^{-5}$

Fonte: <http://www.cultura.ufpa.br/>

b) Dilatação superficial: é a dilatação na qual se consideram duas dimensões que se alteram com a diferença de temperatura. Dessa maneira, podemos verificar que a área do corpo se amplia. É o caso, por exemplo, de uma chapa de espessura desprezível.

Por conseguinte, consideremos uma chapa, com espessura desprezível e área S_0 , quando a temperatura é T_0 e que, ao ser aquecida até uma temperatura T_1 , se dilata superficialmente, apresentando uma área S_1 .

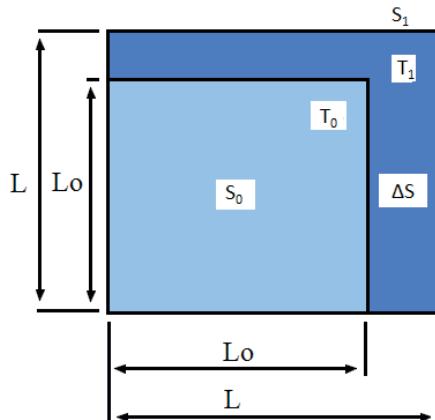
Fonte: <http://senosecosenos.com.br/>

Figura 5 – Dilatação superficial

A dilatação superficial $\Delta S = S_1 - S_0$ é proporcional à área inicial S_0 e à variação de temperatura $\Delta T = T_1 - T_0$.

Logo, podemos escrever:

$$\Delta S \sim S_0 \Delta T$$

Para tornarmos essa proporcionalidade uma igualdade, podemos utilizar uma constante que chamaremos de coeficiente de dilatação superficial (β).

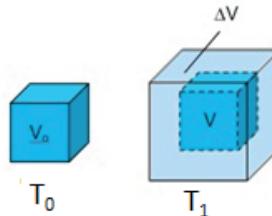
É possível mostrar que $\beta = 2\alpha$, portanto, temos:

$$\Delta S = \beta S_0 \Delta T$$

Ou:

$$S_1 = S_0 + \beta S_0 \Delta T$$

c) Dilatação volumétrica: é a dilatação na qual as três dimensões do corpo variam com o aumento de temperatura. Nesse caso, podemos considerar, por exemplo, um bloco. Assim, tomemos um bloco de volume inicial igual V_0 , quando a temperatura é T_0 e que, após aquecido até uma temperatura T_1 , passa a apresentar um volume V :



Fonte: <http://senosecosenos.com.br/>

Figura 6 – Dilatação volumétrica

A dilatação volumétrica $\Delta V = V_1 - V_0$ é proporcional ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta T = T_1 - T_0$.

$$\Delta V \sim V_0 \Delta T$$

Para tornarmos essa proporcionalidade uma igualdade, podemos usar uma constante que denominaremos coeficiente de dilatação superficial (γ).

É possível mostrar que $\gamma = 3\alpha$, logo, temos:

$$\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$$

Ou:

$$V = V_0 + \gamma V_0 \Delta T$$

14.4 CALOR

Durante muito tempo, até meados do século XIX, acreditou-se que o calor era uma substância denominada calórico, que os corpos continham em si e que poderia ser trocada entre eles de forma espontânea, explicando uma série de fenômenos térmicos até então. Contudo, a partir de estudos realizados por cientistas como Lord Kelvin, Mayer e Joule, o calor passou a ser compreendido como uma forma de energia que os corpos trocam entre si, em função da diferença de temperatura entre eles.

Com base nessa concepção, pode-se definir um corpo A com energia interna U_0 , se as partículas que o compõem apresentam um grau de agitação medida macroscopicamente pela temperatura T_0 . Assim, se considerarmos outro corpo, B, com energia interna U_1 , com as partículas que o compõem em um grau de agitação medida macroscopicamente pela temperatura T_1 , onde $T_1 > T_0$, temos que certa quantidade de energia é trocada entre A e B até que ambos atinjam o equilíbrio térmico, ou seja, apresentem a mesma temperatura.

Essa quantidade de energia trocada entre os corpos é denominada calor.

$$T_1 > T_0$$

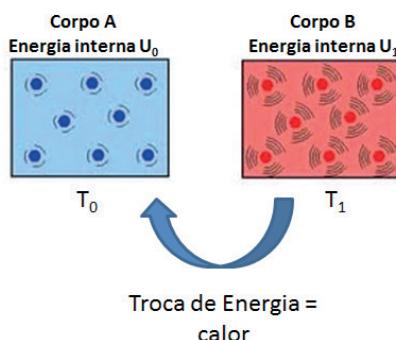


Figura 7 – Troca de calor

Por razões históricas, o calor, que antes era medido em calorias (cal), passou a ser definido também por joule (J) e os seus múltiplos e submúltiplos.

A conversão de joules para calorias se estabeleceu após o famoso experimento realizado por Joule, a partir do qual o famoso cientista definiu o equivalente mecânico de calor:

$$1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$$

14.4.1 CALOR SENSÍVEL

Como vimos, um corpo, numa troca de calor, pode variar sua temperatura. Nesse caso, dizemos que o calor envolvido na troca é chamado de calor sensível.

Para compreender melhor a ideia de calor sensível, imagine que temos dois corpos A e B de massas diferentes, compostos pela mesma substância. Se submetermos ambos à mesma fonte de energia térmica, de forma que ela lhe forneça a mesma quantidade de calor, observaremos que cada um apresentará um aumento de temperatura diferente. Define-se, então, uma capacidade térmica (C) para cada corpo, isto é, a grandeza física que indica a quantidade de calor necessária para produzir, num determinado corpo, uma determinada variação de temperatura.

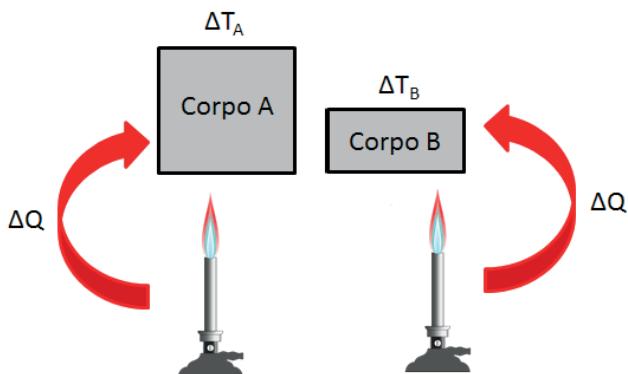


Figura 8 – Corpos de massas recebendo a mesma quantidade de calor da fonte térmica

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

A Unidade de Capacidade térmica será dada em $\frac{cal}{^{\circ}C}$ ou $\frac{J}{K}$

É possível perceber que, quanto maior é a massa do corpo, maior é a sua capacidade térmica. Isso quer dizer que quanto maior for a massa de um corpo, maior deverá ser a quantidade de calor trocada para que ele varie sua temperatura. No caso do exemplo citado acima, o corpo B vai apresentar uma variação de temperatura maior que a do corpo A, já que sua massa é menor.

Se construirmos um gráfico da capacidade térmica em função da massa de três corpos constituídos de diferentes substâncias, obteremos três curvas com inclinações diferentes:

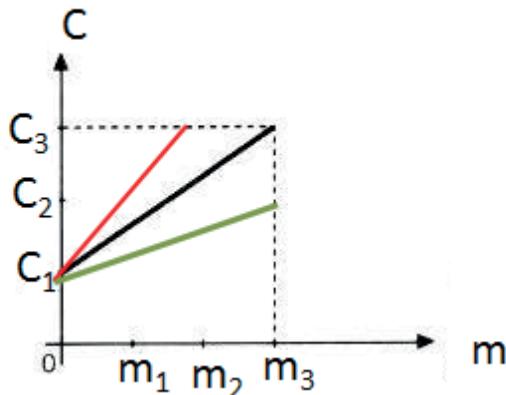


Figura 9 – Gráfico da capacidade Térmica em função da massa

Como a inclinação do gráfico é diferente para diferentes substâncias, a razão entre capacidade térmica e massa para um mesmo corpo evidencia uma constante específica de uma substância. Essa constante é denominada calor específico (c) da substância. Então, c é igual a

$$c = \frac{C}{m}$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$$

A unidade do calor específico é o $\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$ ou $\frac{\text{K}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Tabela 2 – Calor específico de diferentes substâncias

Substância	Calor específico (cal/g.ºC)
Água	1
Alumínio	0,214
Amônia (líquida)	1,125
Bromo (sólido)	0,088
Bromo (líquido)	0,107
Cobre	0,0921
Cloreto de sódio	0,204
Chumbo	0,0306
Etanol	0,581
Gelo	0,502
Lítio	1,041
Mercúrio	0,03325

Fonte: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/>

A partir das equações, podemos definir que calor sensível pode ser calculado por

$$Q = mc\Delta T$$

14.4.2 CALOR LATENTE

Nem sempre trocas de calor resultam em aumento ou diminuição de temperatura dos corpos envolvidos. Às vezes, acontecem mudanças de fase.

De forma mais comum, as substâncias apresentam-se na natureza em três diferentes fases: sólido, líquido e gasoso.

Cada uma dessas fases depende da pressão e da temperatura a que os corpos, constituídos de determinada substância, estão submetidos. Em condições normais de pressão, a variação da temperatura é responsável pela alteração das fases, porque, com o aumento da temperatura, aumentam-se também as vibrações das partículas que compõem a matéria e, à medida que isso ocorre, há um aumento das distâncias entre os átomos.

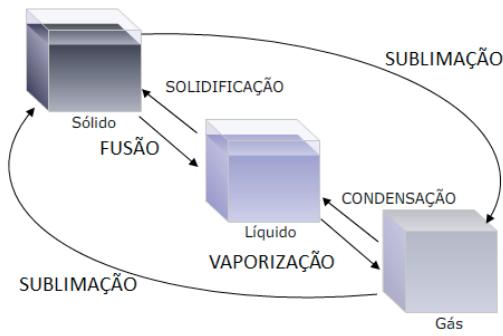


Figura 10 – Mudanças de fases: sólido, líquido e gasoso

A seguir, apresentamos a curva de aquecimento para uma substância genérica, relacionando temperatura *versus* quantidade de calor, evidenciando as mudanças de fase da matéria, considerando a pressão normal.

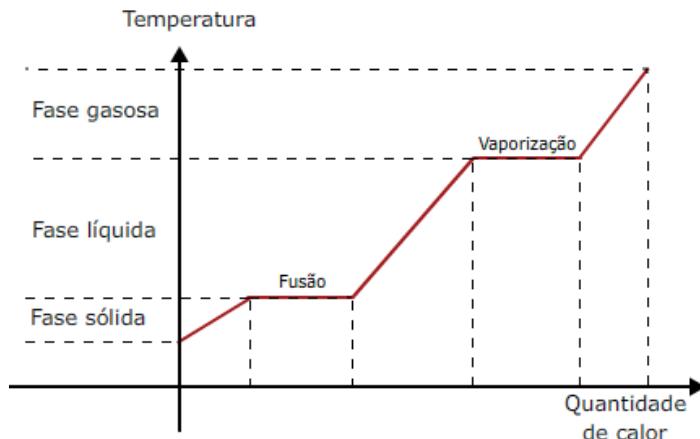


Figura 11 – Gráfico da Temperatura verusus Quantidade de calor

É possível observar que, durante a fusão e a vaporização, ou seja, nos processos de mudança de fase, a temperatura se manteve constante, contudo, a troca de calor continuou acontecendo. Assim, diferentemente dos fenômenos envolvendo troca de calor sensível que implicam variação da temperatura, no fenômeno de mudanças de fase, as trocas de calor não acarretam variação da temperatura. Esse tipo de troca de calor é denominado calor latente (L).

Matematicamente, podemos definir que

$$Q = mL$$

onde Q é a quantidade de calor trocada e L é o calor latente.

Podemos verificar experimentalmente que, mantendo a pressão normal, a massa de 1 grama de água à temperatura de 0°C , na fase sólida, necessita trocar com o meio 80 cal de calor para se transformar, na fase líquida, à temperatura de 0°C . Se a massa de 1 grama de água se encontrar na fase gasosa, à temperatura de 100°C , à pressão constante, necessitará trocar 540 cal com o meio para transformar-se na fase líquida, à temperatura de 100°C . Portanto, dizemos que o calor latente de fusão ou solidificação da água vale 80 cal, enquanto o calor latente de condensação ou vaporização da água vale 540 cal.

Nesse sentido, para cada substância, há um calor latente característico de cada uma. Na tabela a seguir, apresentamos alguns valores de calor latente de algumas substâncias.

Tabela 3 – Calor latente de fusão (LF) e calor latente de vaporização (LV) de algumas substâncias

Substâncias	Calor Latente de fusão [cal/ °C]	Calor Latente de vaporização [cal/ °C]
Água	80	540
Álcool	25	204
Cobre	49	1288
Ferro	64	1508
Alumínio	95	2569
Chumbo	6	209
Hidrogênio	14	108
Prata	21	559
Zinco	24	475
Ouro	15	376
Mercúrio	2,7	65

Fonte: <http://coral.ufsm.br>

Obs.: Pense o calor latente e o calor sensível como tipos de energia potencial e cinética. Note que, assim como a energia potencial tem relação com a posição do corpo, o calor latente tem a ver com a posição das partículas (uma em relação às outras). Da mesma maneira, assim como a energia cinética relação com a velocidade do corpo, o calor sensível tem a ver com a temperatura (grau de agitação das partículas que compõem) do corpo.

14.5 TROCAS DE CALOR

Como vimos, o calor é uma forma de energia e, portanto, nas trocas de calor, devemos considerar o Princípio da Conservação da Energia.

Por isso, pode-se afirmar que, quando dois ou mais corpos que estão a diferentes temperaturas, colocados num sistema que pode ser considerado termicamente isolado (ou seja, que não troca calor com o meio externo) a soma das quantidades de calor trocadas – calor recebido (Q_R) e calor cedido (Q_C) – é zero. Matematicamente, podemos escrever que

$$\sum Q_R + \sum Q_C = 0$$

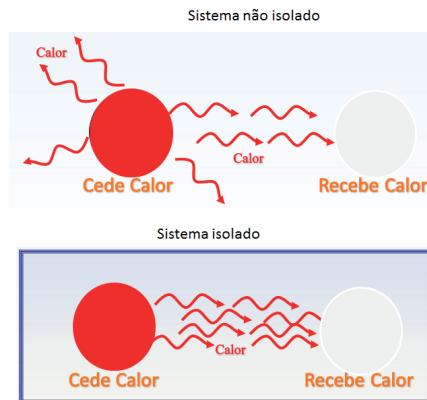
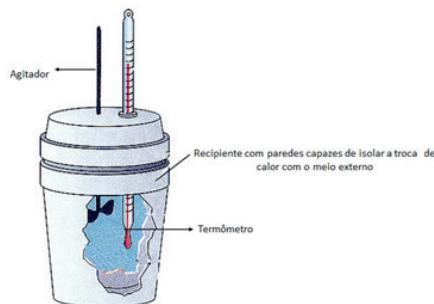


Figura 12 – Trocas de calor em sistema isolado e não isolado

14.5.1 CALORÍMETROS

Para que estudos sobre troca de calor possam ser realizados, é comum empregar, em laboratórios, um equipamento denominado calorímetro.

Os calorímetros são aparelhos construídos de tal forma que permitem, até certo ponto, o isolamento térmico dos corpos colocados em seu interior com o meio externo.



Fonte: <http://www.chimica-online.it/download/calorimetro.htm>

Figura 13 – Calorímetro

14.6 PROPAGAÇÃO DO CALOR

Os corpos trocam constantemente calor entre si; para que isso ocorra, basta que exista diferença de temperatura entre eles. Por conseguinte, esse processo perdura até que se dê o equilíbrio térmico, quer dizer, até que os corpos atinjam a mesma

temperatura. Assim, o corpo mais quente tende a diminuir temperatura, cedendo calor para o corpo mais frio, o qual tende a aumentar sua temperatura.

Nas trocas de calor, podemos identificar três formas de propagação: a condução, a convecção e a radiação.

14.6.1 CONDUÇÃO

Nessa forma de propagação de calor, temos que a troca de energia térmica se estabelece, por contato, de uma região para outra do mesmo corpo ou para corpos diferentes.

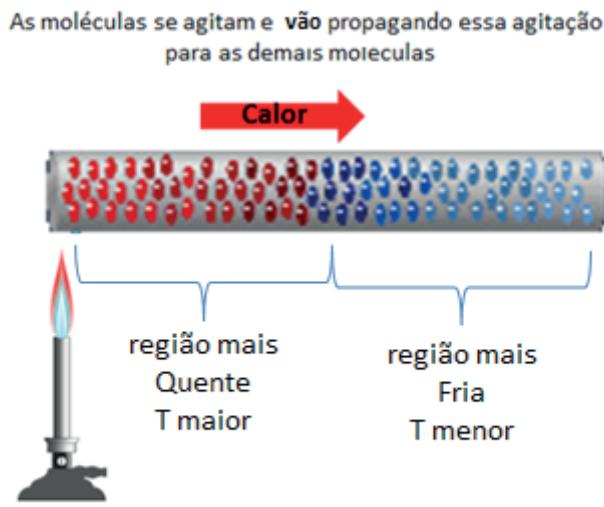


Figura 14 – Transferência de calor por condução

No processo de propagação de calor, por condução, quanto mais próximas as moléculas estiverem uma das outras, melhor. Portanto, como nos sólidos as moléculas se encontram mais próximas do que as dos líquidos e que as dos gases, podemos afirmar que os sólidos são melhores condutores de calor. Dentre os sólidos, destacam-se os metais. Todavia, a condutibilidade térmica, propriedade dos materiais que indica a maior ou menor facilidade de conduzirem calor, varia mesmo dentre os diferentes sólidos e mesmo dentre os metais. Dessa forma, por apresentarem maior ou menor facilidade em conduzir calor, podemos atribuir a cada um deles um coeficiente de condutibilidade térmica (K) diferente.

A unidade de condutibilidade térmica é dada, no SI, por $\frac{W}{m \cdot K}$

A seguir, apresentamos uma tabela que mostra a condutibilidade térmica de alguns materiais.

Tabela 4 – Condutibilidade térmica de algumas substâncias

MATERIAIS	Condutibil. Térm.
	K W/m.k
Água (10 °C)	0.60
Aglomerado de cortiça	0.05
Gesso cartonado	0.25
Solo (pesado)	1.51
Painéis de fibras de madeira (MDF)	0.14
Tijolo furado	0.47
Estuque (gesso)	0.40
Vidro float	1.00
Lã mineral	0.04
Argamassa de Cimento	1.30
Pedra (calcário duro)	2.30
Poliestireno expandido moldado	0.04
Ferro	72.00
Alumínio	230.00

Fonte: <http://fep.if.usp.br/>

Perceba que, num ambiente a 20° C, por exemplo, se você tocar com sua mão um painel de madeira tipo MDF e uma barra de alumínio, terá a sensação de que a barra de alumínio está mais fria do que o painel de madeira. Isso é apenas uma sensação. Ambos estarão à mesma temperatura, contudo, como a barra de alumínio tem um condutibilidade térmica maior, a troca de calor com sua mão é mais fácil do que com a madeira.

A condutibilidade térmica também tem relação com ações humanas, para evitar perdas de calor, como, por exemplo, o uso do cobertor (ele não nos aquece, pois não é fonte de calor, apenas evita que nosso corpo troque calor com facilidade com o meio externo), o mesmo acontecendo com as roupas de inverno e na construção das habitações.



Fonte: <http://felipepepizi.blogspot.com.br/>

Figura 15 – Construção de um iglu

Os iglus são moradias construídas pelas esquimós. O gelo é um bom isolante térmico.

À medida que o calor se propaga pelo corpo, por exemplo, uma barra, a temperatura do corpo se altera, ao longo de seu comprimento. Desse modo, pode-se observar uma direção e um sentido pelos quais a temperatura vai mudando, ao longo do corpo.

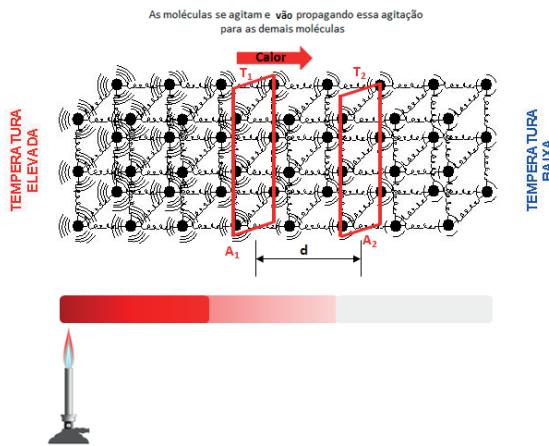


Figura 16 – Gradiente de temperatura

Podemos definir como gradiente de temperatura (∇T) a variação de temperatura ao longo do corpo que conduz o calor.

Assim, se imaginarmos duas superfícies A_1 e A_2 ao longo do corpo, com uma distância d entre si, observaremos duas diferentes temperaturas T_1 e T_2 . Logo:

$$\nabla T = \frac{T_2 - T_1}{d}$$

A unidade de gradiente de temperatura pode ser dada em: $\frac{K}{m}$

ou $\frac{K}{mm}$

Podemos definir, também, fluxo de calor (Φ) como sendo a quantidade de calor (Q) que atravessa uma superfície do corpo que o conduz por unidade de tempo Δt . Matematicamente, podemos escrever:

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

$$\frac{cal}{s} \text{ ou } \frac{J}{s} = W$$

A unidade de fluxo de calor pode ser dada em $\frac{cal}{s}$

Fourier, ao estudar experimentalmente o fluxo de calor que atravessa a superfície tranversal de um condutor térmico de área A , enunciou a seguinte lei:

“O fluxo de calor que atravessa uma superfície tranversal de um condutor térmico em regime estacionário é igual ao produto do coeficiente de condutibilidade térmica pelo gradiente de temperatura e à área dessa superfície tranversal”.

Podemos escrever:

$$\Phi = K A \nabla T$$

Ou:

$$\Phi = K A \frac{T_2 - T_1}{d}$$

14.6.2 CONVEÇÃO

A convecção é o processo de propagação de calor que se estabelece nos fluidos, quer dizer, nos líquidos e nos gases. Acontece por meio dos movimentos do próprio fluido, caracterizando as correntes de convecção. Elas são geradas a partir do aquecimento do fluido, que, quando aquecido, tende a diminuir sua densidade e, nesse caso, tende a subir, sendo substituído por outra parte do fluido mais frio, produzindo as correntes.

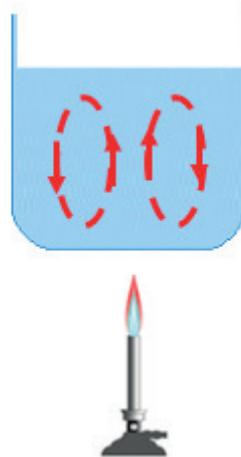
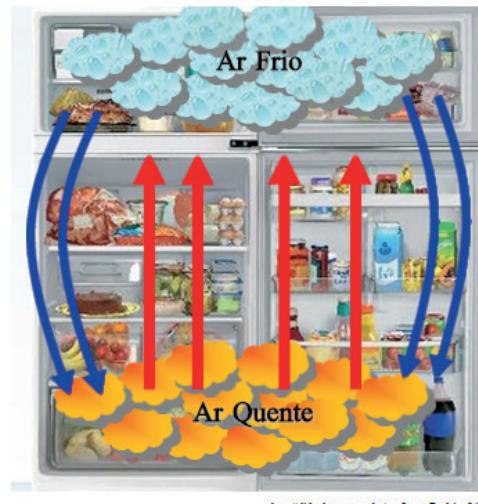


Figura 17 – Transferência de calor por convecção

As correntes de convecção se dão também no interior da geladeira, no aparelho de ar condicionado instalado numa sala e nos fenômenos de brisa continental e marítima.

Note que um congelador é localizado na parte de cima da geladeira: isso tem um motivo físico. Como o ar frio, proveniente do congelador, exerce menor pressão sobre o ar quente proveniente dos alimentos colocados na geladeira, tende a descer, empurrado pelo ar quente, o qual tende a subir, gerando correntes de convecção.



<http://slideplayer.com.br/professor/RodrigoLins>

Figura 18 – Convecção na geladeira

O mesmo ocorre com o ar condicionado, que deve ser colocado no alto de uma parede e não em sua parte inferior.

Com relação às brisas marítimas e continentais, já aprendemos o conceito de calor específico e que o calor específico da água é bem maior do que muitas outras substâncias. Por conseguinte, é preciso trocar bem mais calor para aquecer a água do que a mesma quantidade de solo, por exemplo.

Assim, durante o dia, o Sol aquece o continente mais rápido do que aquece a água. Por isso, nesse período, por convecção, o ar aquecido no continente, menos denso, sobe, enquanto o ar frio sobre o mar se desloca do mar para a areia, provocando a brisa marítima.

À noite, com o pôr do Sol, a água do oceano está mais quente, aquece o ar que está acima dele, enquanto o ar sobre a areia se esfria rápido. O ar sobre as águas, por convecção, tende a se expandir e subir, enquanto o ar sobre o continente se desloca no sentido do mar: é a brisa continental.



Figura 19 – Brisas marítmas

14.6.3 RADIAÇÃO

Se, na condução e convecção, a propagação do calor envolve meios materiais, na radiação, o calor propaga-se também no vácuo, por meio de ondas eletromagnéticas.

Dependendo da energia transportada pela onda, seu comprimento de onda pode ser maior ou menor.

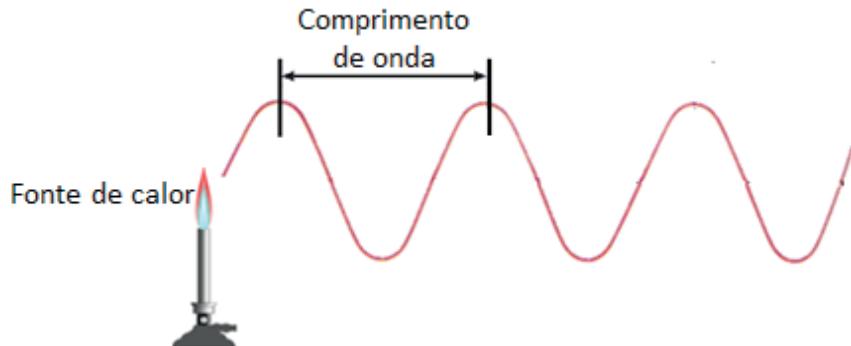


Figura 20 – Radiação térmica

Pode-se definir espectro eletromagnético como o intervalo no qual todas as radiações (de diferentes comprimentos de onda) estão contidas.

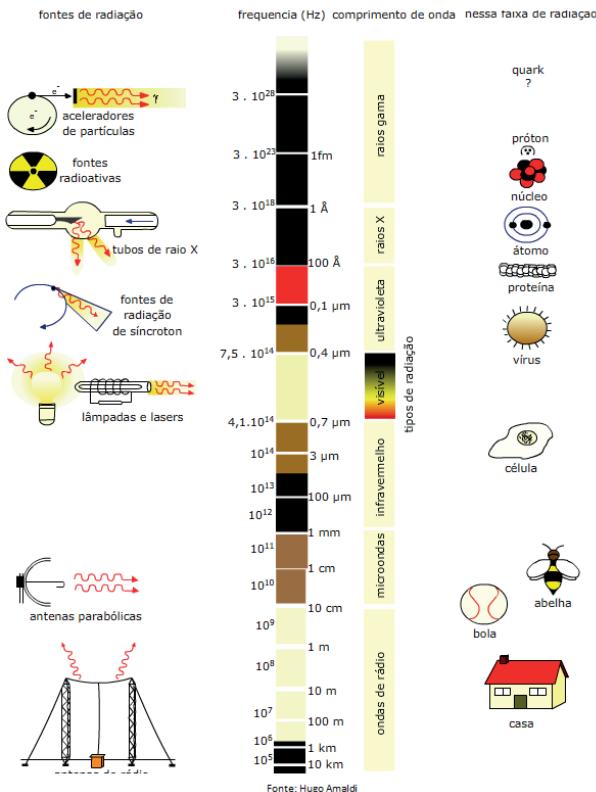
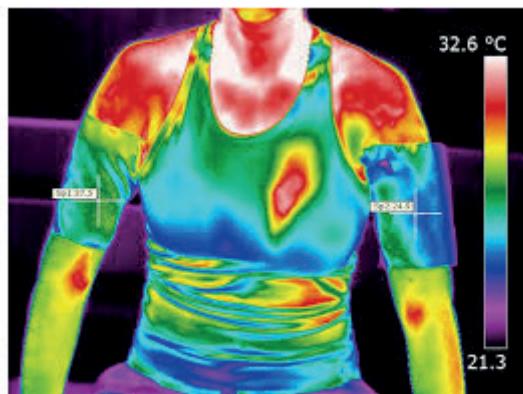


Figura 21 – Espectro eletromagnético

Ao aquecermos um corpo, suas partículas dotadas de cargas elétricas vibram mais intensamente e, dessa maneira, produzem radiações eletromagnéticas com comprimento de onda típica do infravermelho. Você entenderá melhor essa questão, quando estudar ondulatória e eletromagnetismo.



Fonte: <http://www.cienciahoje.uol.com.br>

Figura 22 – Fotografia termográfica: é possível observar variações de calor por meio da radiação infravermelha emitida pelos objetos

Todo corpo com temperatura acima de 0 K emite radiação, pois suas partículas carregadas eletricamente vibram, no entanto, é importante destacar que, quanto maior for a temperatura do corpo, maior será a potência da radiação emitida por ele e menor será o comprimento de onda dessa radiação.

14.6.3.1 LEI DA RADIAÇÃO DE KIRCHHOFF E DEFINIÇÃO DE CORPO NEGRO

Neste tópico, dois conceitos são importantes: o de emissividade e o de absorтивidade. Para tanto, vamos nos lembrar das aulas de Química sobre atomística:

A ABSORÇÃO ocorre quando uma radiação, incidente sobre um átomo da superfície de um material, faz um elétron “saltar” de uma órbita inferior para uma superior. Nesse caso, a radiação é absorvida.

A EMISSÃO acontece quando um elétron de um átomo, da superfície de um material que irradia onda eletromagnética, “salta” de uma órbita superior para uma inferior. Nesse caso, a radiação é produzida.

Portanto, tanto a emissão quanto a absorção dependem da superfície dos materiais. Logo, podemos definir emissividade (ϵ) como a capacidade que uma determinada superfície tem de emitir uma radiação eletromagnética, podendo variar entre os valores 0 e 1.

A absorbividade (α) é a capacidade que uma determinada superfície tem de absorver uma radiação eletromagnética, podendo os valores também variar entre 0 e 1.

Segundo a Lei de Kirchhoff para a radiação, a capacidade de uma superfície absorver determinada radiação é igual à sua capacidade de emitir essa mesma radiação. Ou seja:

$$\epsilon = \alpha$$

É importante concluir que todo corpo está emitindo e absorvendo energia, na forma de radiação eletromagnética. Se, num determinado intervalo de tempo, o corpo absorver mais radiação do que emitiu, sua temperatura vai aumentar. Ao contrário, se emitir mais radiação do que absorver, sua temperatura tende a diminuir. Contudo, no equilíbrio térmico, as radiações emitidas e absorvidas, tendo em vista um mesmo intervalo de tempo, são iguais.

Outra consideração importante da Lei da radiação de Kirchhoff é quanto à superfície ideal, ou seja, aquela que tem a capacidade de absorver toda a radiação nela incidente, isto é, $\alpha=1$. Nesse caso, sua emissividade também será máxima, portanto, $\epsilon=1$. Essa superfície ideal é a de um corpo ideal que os físicos denominam corpo negro.

Assim, um corpo negro é um corpo hipotético (um modelo) cuja absorbividade e emissividade são máximas, todavia, a emissão da radiação se dá num comprimento de onda que depende de sua temperatura.

14.6.3.2 LEI DE STEFAN-BOLTZMANN E LEI DE DESLOCAMENTO DE WIEN

Você deve se lembrar do conceito de potência como sendo a razão entre energia e tempo. A Lei de Stefan-Boltzmann afirma que potência total irradiada (P) por um corpo negro com superfície emissora de área A e temperatura absoluta T é dada por:

$$P = \sigma AT^4$$

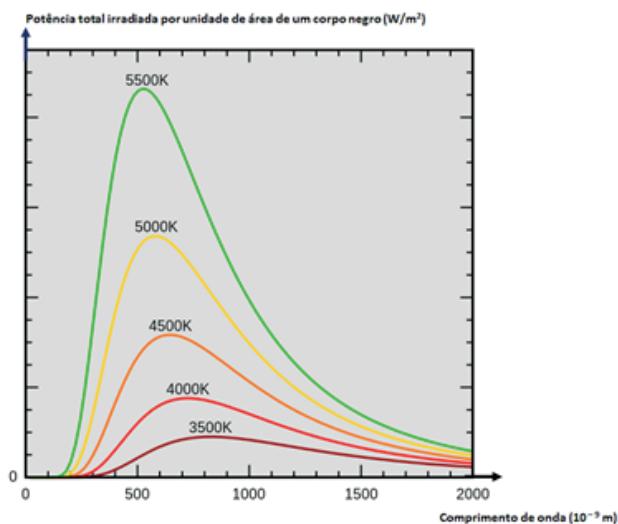
sendo σ a constante de Boltzmann cujo valor em unidades do SI é $5,7 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Foi Wien quem percebeu que o comprimento de onda máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) da radiação emitida por um corpo negro era inversamente proporcional à sua temperatura (T). Portanto, matematicamente, a Lei de Wien pode ser escrita da seguinte forma:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T}$$

onde b é uma constante de valor, nas unidades do SI, igual a $2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$

No gráfico da potência total irradiada por unidade de área de um corpo negro, em função do comprimento de onda emitido, é possível verificar a Lei de Wien. Note que o pico da curva se desloca, de modo que $\lambda_{\text{máx}}$ diminui quando T aumenta:



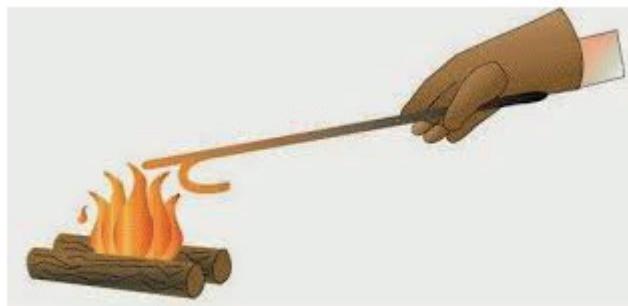
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro

Figura 23 – Gráfico da potência irradiada por unidade de área de um corpo negro versus o comprimento de onda

Ao determinarmos a potência total irradiada por um corpo real aquecido, devemos levar em conta a emissividade (e) desse corpo:

$$P = e \sigma A T^4$$

Apesar de separarmos os processos de propagação de calor, muitas vezes eles se manifestam conjuntamente. Por exemplo, considere uma pessoa que aquece uma barra de ferro numa fogueira.



Fonte: <http://www.brasilescola.com/>

Figura 24 – Barra de ferro aquecida em uma fogueira

A fogueira propaga calor por condução, por radiação e por convecção.



Fonte: <http://www.brasilescola.com/>

Figura 25 – Barra de ferro aquecida em uma fogueira: três processos de propagação de calor

15 TERMODINÂMICA

A Termodinâmica é a parte da Física que estuda as relações entre trabalho mecânico com trocas de calor, realizado por máquinas térmicas.

Na parte da Dinâmica, você estudou que um trabalho mecânico era feito a partir da variação de energia cinética e potencial. Em termodinâmica, a ideia é a mesma; nesta parte, todavia, a energia está na forma de calor e o material utilizado é composto pelos gases.

15.1 GASES PERFEITOS

Em nossos estudos, trabalharemos com um modelo de gás que chamaremos de gases perfeitos, os quais são idealizações dos gases reais. Esse modelo construído pelos físicos, que em determinadas condições se aproxima da realidade, admite que:

- um gás é constituído por moléculas cujos diâmetros são desprezíveis em relação ao espaço no qual se movimentam, desordenadamente, em todas as direções e sentidos;

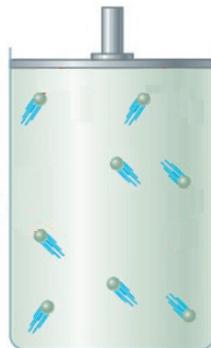


Figura 1 – Gás, confinado em um recipiente

- cada uma das moléculas que compõe um gás interage com outras apenas por meio de colisões;

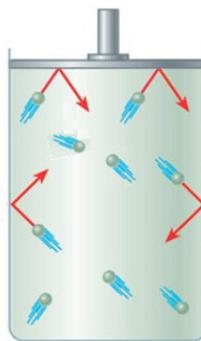


Figura 2 – Partículas do gás chocando-se contra as paredes do recipiente

- todas as colisões entre as moléculas, constituintes de um gás, e destas com as paredes do recipiente que as contém, são consideradas perfeitamente elásticas; assim, a energia cinética total se conserva, mas a velocidade de cada molécula pode variar.

O estado de um gás é bem caracterizado a partir de três grandezas: pressão, volume e temperatura. Com já sabemos, a temperatura está relacionada à agitação das moléculas que compõem o gás. Desse modo, quanto maior for a velocidade das moléculas do gás, maior será a sua temperatura, e quanto menor for a velocidade das moléculas do gás, menor sua temperatura.

O volume é o espaço tridimensional ocupado pelo gás. Diferentemente dos sólidos e dos líquidos, os quais ocupam um volume definido, os gases ocupam todo o volume do recipiente que os contém.



Figura 3 – Variação no volume de um gás

A pressão exercida por um gás diz respeito às colisões que suas moléculas realizam contra as paredes do recipiente que as contém; lembre-se de que um gás é constituído por moléculas que estão em movimento desordenado e, por isso, batem constantemente nas paredes do recipiente onde estão contidas, exercendo pressão.

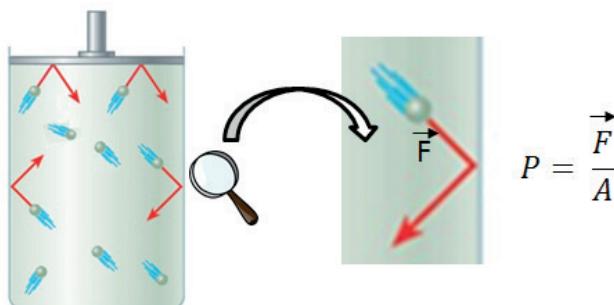


Figura 4 – O choque das partículas contra as paredes do recipiente produz pressão

Qualquer alteração nessas três grandezas define uma transformação gasosa.

15.2 TRANSFORMAÇÕES GASOSAS

Podemos caracterizar quatro tipos de transformações gasosas:

- transformação isotérmica;
- transformação isobárica;
- transformação isométrica (isovolumétrica) ou isocórica; e
- transformação adiabática.

A transformação isotérmica é aquela na qual, mantendo-se constante a temperatura, pode-se observar a relação de variação entre pressão e volume. Para compreender essa transformação gasosa, considere um gás com uma temperatura T_1 , volume V_1 e Pressão P_1 .

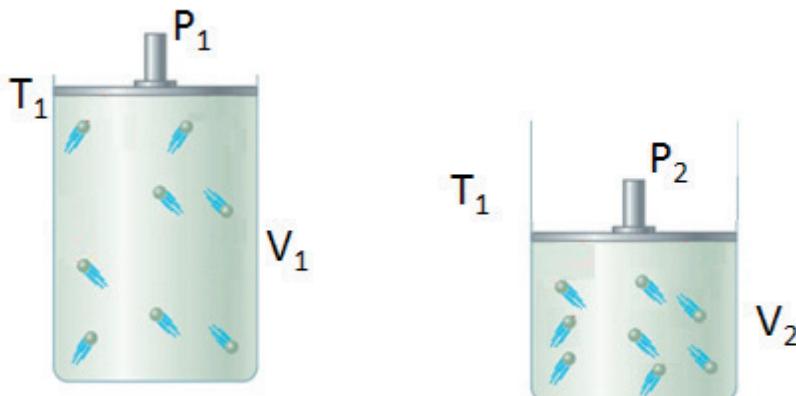


Figura 5 – Transformação gasosa à temperatura constante

Agora, mantendo a temperatura constante, move o êmbolo do recipiente para baixo, diminuindo o volume. Nesse caso, com menos espaço, tenderá a ocorrer um aumento da pressão, pois as moléculas tenderão a colidir mais vezes contra as paredes do recipiente. Por conseguinte, nas transformações isotérmicas, a pressão e o volume são inversamente proporcionais. Essa conclusão é conhecida como Lei de Boyle-Mariotte.

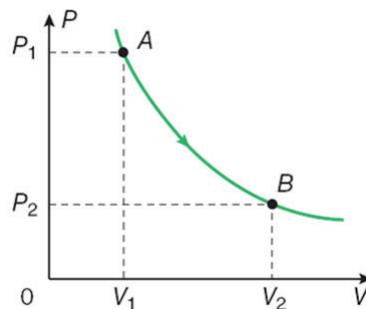


Figura 6 – Representação gráfica de uma transformação isotérmica

A transformação isobárica acontece quando mantemos a pressão constante e observamos a relação entre temperatura e volume. Para tanto, vamos considerar um gás com uma temperatura T_1 , volume V_1 e Pressão P_1 . Se mantivermos a pressão constante e aumentarmos a temperatura, ou seja, aumentarmos o grau de agitação das moléculas no interior do recipiente, precisaremos aumentar igualmente o volume, pois, caso contrário, a pressão aumentará.

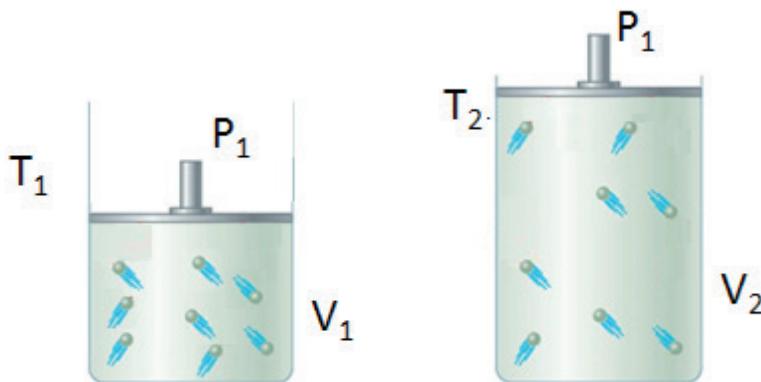


Figura 7 – Transformação gasosa à pressão constante

Portanto, na transformação isobárica, temperatura e volume são diretamente proporcionais. Essa conclusão é conhecida como Lei de Gay-Lussac.

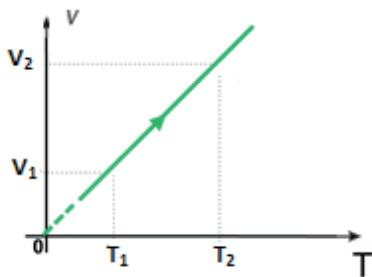


Figura 8 – Representação gráfica da transformação isobárica

Na transformação isométrica (isovolumétrica) ou isocórica, o volume é mantido constante, com o objetivo de se observar a relação entre temperatura e pressão. Considerando um gás com uma temperatura T_1 , volume V_1 e Pressão P_1 , ao aumentarmos a temperatura, verificamos que, com o aumento da agitação das moléculas, o gás aumenta a pressão sobre as paredes do recipiente.

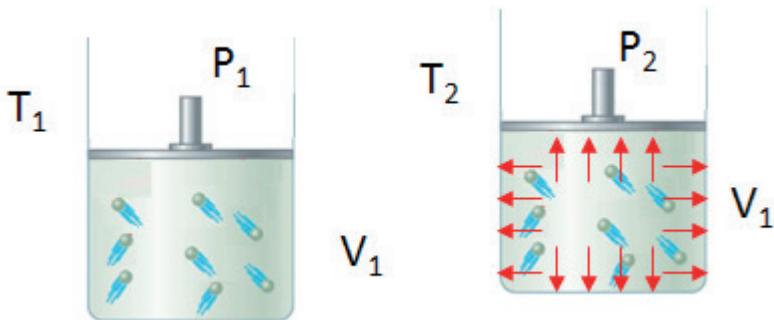


Figura 9 – Transformação à volume constante

Logo, na transformação isocórica, temperatura e a pressão são diretamente proporcionais. Essa conclusão é conhecida como Lei de Charles.

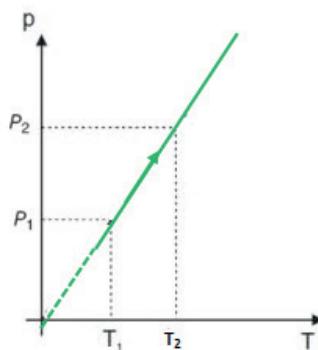


Figura 10 – Representação gráfica da transformação isovolumétrica

Na transformação adiabática, o gás não troca calor com o meio, porém, se alterarmos o valor de todas as variáveis, temos que:

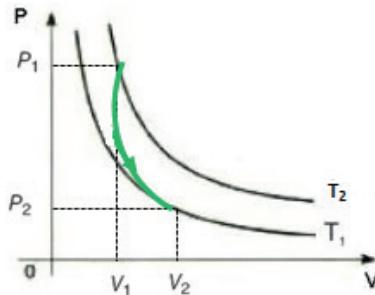


Figura 11 – Representação gráfica da transformação adiabática

Assim,

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \text{constante}$$

Então, se escolhermos valores referência para a pressão, volume e temperatura, definimos uma condição para o gás na qual se torna possível definir o valor da constante. Dessa forma, em condições normais de temperatura e pressão, ou seja, $T_0 = 273\text{ K}$ ou 0°C e $P_0 = 1\text{ atm}$ ou $1 \times 10^5\text{ Pa}$, sabemos em 1 mol de qualquer gás ocupa um volume de 22,4 litros ou $22,4 \times 10^{-3}\text{ m}^3$. Portanto,

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} = R$$

$$\frac{J}{mol \cdot K}$$

onde R é a constante geral dos gases e, em unidades do SI, vale: 8,314

Assim, para a caracterização de um gás, temos a equação de Clapeyron:

$$PV = nRT$$

onde n é o número de mols do gás.

15.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Como já sabemos, o calor é a forma de energia trocada entre dois corpos, os quais apresentam diferentes temperaturas entre si, até que se atinja o equilíbrio térmico entre eles.

Sabemos também que a energia se conserva, isto é, não pode ser criada e nem destruída, porém, se transforma.

Consideremos um sistema, composto por dois corpos, 1 e 2, com temperatura diferentes entre si T_1 e T_2 , respectivamente, completamente isolados termicamente do meio exterior. Assim, só se admitem trocas de calor entre os corpos que compõem o sistema. Se $T_2 > T_1$, haverá troca de calor entre os corpos.

Sistema termicamente isolado com o meio externo

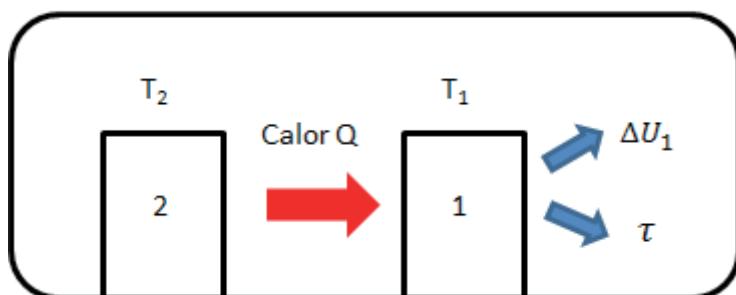


Figura 12 – troca de calor num sistema isolado

Quando o corpo 2 troca calor (Q) com o corpo com temperatura T_1 , a energia interna do corpo 1 tende a aumentar ΔU (consequentemente, sua temperatura tende a aumentar também), no entanto, é possível que o corpo 1 realize trabalho (τ) com o calor trocado com o corpo 2. Tendo em vista o Princípio da Conservação da Energia, podemos afirmar que

$$Q = \Delta U + \tau$$

Ou, como normalmente se encontra escrito, a primeira Lei de Termodinâmica pode ser expressa:

$$\Delta U = Q - \tau$$

Como o corpo 1 pode realizar trabalho?

Ora, considere que o corpo 1 seja um gás ideal confinado em um recipiente contendo um êmbolo. Ao receber calor (Q), a energia interna do gás tende a aumentar, portanto, sua temperatura também, de forma que as moléculas que o compõem se agitam mais e exercem pressão sobre as paredes do recipiente e sobre o êmbolo. Como o êmbolo é móvel, este se desloca, percorrendo uma certa distância (d), realizando, pois, trabalho (τ).

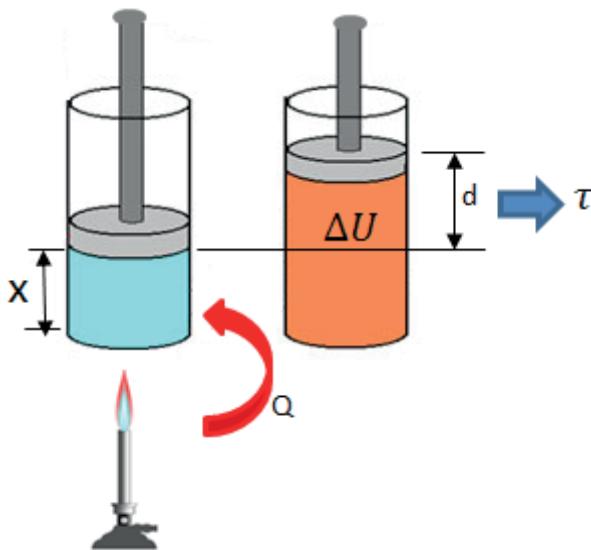


Figura 13 – Realização de trabalho por um gás

Você já estudou que trabalho pode ser calculado por

$$\tau = F \cdot d$$

Como pressão é a relação força sobre área, temos:

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = P \cdot A$$

Consequentemente, temos que

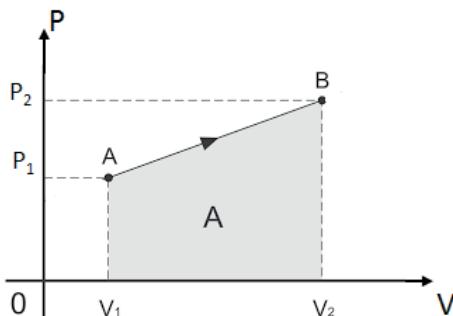
$$\tau = F \cdot d = PAd$$

O produto da área pela distância d , que pode variar, é igual à variação do volume ocupado pelo gás (ΔV); assim, podemos escrever que o trabalho de um gás, sob pressão constante, ou seja, numa transformação gasosa isobárica, é

$$\tau = P\Delta V$$

Note que, se ΔV for positivo, isto é, se o volume final for maior que o volume inicial ($V_f - V_i > 0$), houve uma expansão e o trabalho será positivo. Dessa maneira, dizemos que o gás realizou trabalho. Porém, se ΔV for negativo, isto é, se o volume final for menor que o volume inicial, houve uma compressão e o trabalho será negativo. Nesse caso, dizemos que foi realizado trabalho sobre o gás.

Numa transformação na qual a pressão não é constante, o cálculo do trabalho será dado pela área da figura formada sob o gráfico da pressão versus volume ($P \times V$),



$$\tau = \text{gráfico}_P \times V$$

Figura 14 – Trabalho realizado por um gás sob pressão variável

Agora, vamos imaginar um gás ideal passando por uma transformação gasosa isométrica (isovolumétrica) ou isocórica, na qual o volume é constante e, portanto, $\Delta V = 0$. Nesse caso, o trabalho é nulo ($\tau = 0$), logo:

$$\Delta U = Q - \tau$$

$$\Delta U = Q$$

Por essa equação, podemos notar que, se o gás recebeu calor na troca, toda a energia foi utilizada para aumentar sua energia interna, de sorte que a temperatura do gás aumentou. Contudo, se o gás, na troca, perdeu calor, sua energia interna diminuiu, logo, sua temperatura também diminuiu.

Se analisarmos uma transformação adiabática, ou seja, na qual não há troca de calor ($Q = 0$), temos que:

$$\Delta U = Q - \tau$$

$$\Delta U = -\tau$$

Quando isso ocorre, é possível perceber que, se o trabalho for positivo (expansão do gás), ou seja, se o gás realizar trabalho, isso acontecerá às custas de sua própria energia interna e, portanto, a temperatura do gás diminuirá.

Porém, se o trabalho for negativo (compressão do gás), quer dizer, for realizado um trabalho sobre o gás, haverá um aumento da energia interna do gás e sua temperatura aumentará.

Finalmente, se o gás ideal sofrer uma transformação isotérmica, ou seja, com temperatura constante, consequentemente a energia interna do gás não vai variar, logo $\Delta U = 0$, de forma que temos:

$$0 = Q - \tau$$

$$Q = \tau$$

Nesse caso, é possível notar que todo o calor trocado com o gás será usado para a realização de trabalho.

Aqui, vale a pena destacar transformações gasosas que acontecem em ciclo. Numa transformação cíclica, na qual o gás ideal, após passar por uma transformação, retorna às condições iniciais, temos que o trabalho realizado será igual à área da figura circunscrita pelo gráfico da pressão versus volume ($P \times V$) :

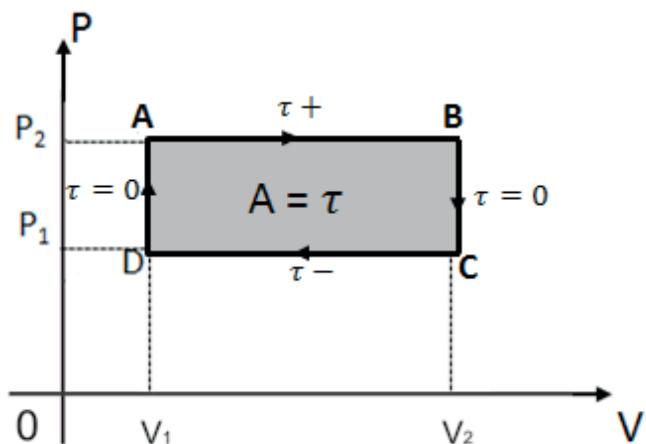


Figura 15 – Trabalho realizado por um gás num ciclo

Observe, pois, que o trabalho é a área da figura gerada pela transformação AB subtraída da área da transformação CD. Como não há variação de volumes em BC e DA, os trabalhos nessas transformações são nulas.

15.4 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Considerando as análises que foram efetuadas a partir das transformações gasosas em comparação com a primeira Lei da Termodinâmica, pode-se construir uma máquina térmica que utilize o calor trocado para a máxima realização de trabalho possível, escolhendo as transformações gasosas adiabáticas e isotérmicas e evitando as transformações gasosas isocóricas.

Assim, Carnot propôs uma máquina térmica ideal que funciona em um ciclo formado por duas isotérmicas e duas adiabáticas.

Para entender bem a máquina de Carnot, considere certa quantidade de massa de gás ideal confinada em um recipiente contendo um êmbolo, no qual três de suas paredes não permitem a troca de calor com o meio externo, com exceção de sua parte de baixo. Admita que, em condições iniciais, o gás está sob pressão P_1 , uma temperatura T_1 , ocupando um volume V_1 .

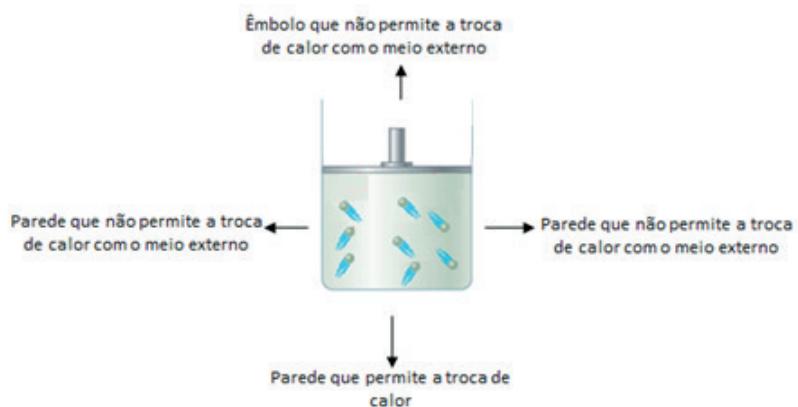


Figura 16 – Situação ideal para análise do ciclo de Carnot

Se aquecermos o gás, empregando uma fonte de calor que denominaremos quente, cuja temperatura permanece constante, a agitação térmica do gás tenderá a aumentar, mas, como a pressão aumenta e levanta o êmbolo, aumentando o volume, pode-se admitir uma expansão gasosa sem variação de temperatura (expansão isotérmica). Nesse caso, todo calor fornecido pela fonte quente (Q) é utilizado para realizar trabalho (T).

A partir dessa expansão, o gás passa a um estado no qual é uma pressão P_2 , à temperatura T_1 , ocupando um volume V_2 .

Se provocarmos uma expansão adiabática no gás, ele passa para o estado P_3 , V_3 , T_2 , onde T_2 é a chamada de temperatura da fonte fria. Nessa situação, o gás realiza trabalho às custas de sua própria energia interna e, nesse caso, a sua temperatura diminui para T_2 .

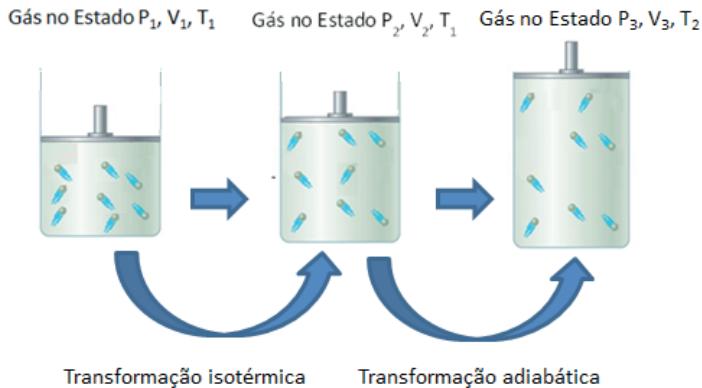


Figura 17 – Sequências de transformações gasosas na etapa de expansão do ciclo de Carnot

Agora, submete-se o gás a uma compressão isotérmica, de tal modo que ele assuma o estado P_4, V_4, T_2 . Nesse caso, o trabalho é negativo, indicando que foi feito um trabalho sobre o gás, tão lentamente, que a temperatura não se alterou.

Para completar o ciclo, finalmente, o gás é comprimido adiabaticamente até o estado P_1, V_1, T_1 . Para tanto, mais um trabalho é realizado sobre o gás, nesse caso, aumentando a energia interna do gás e, consequentemente, sua temperatura.

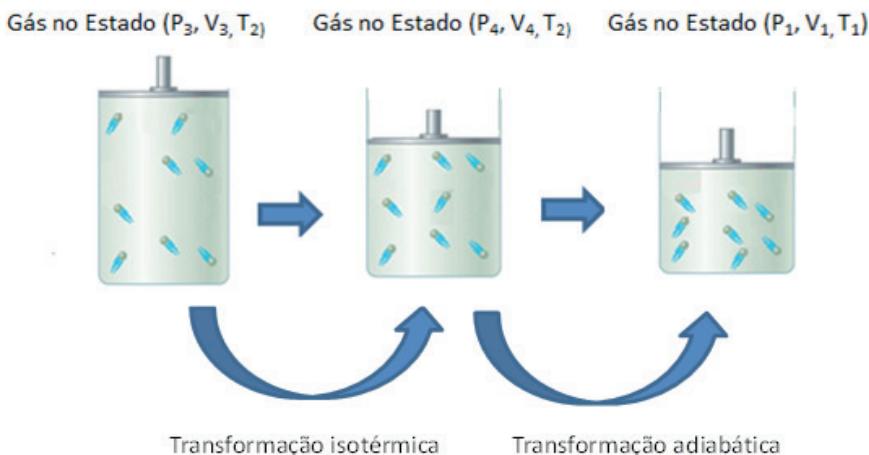


Figura 18 – Sequências de transformações gasosas na etapa de compressão do ciclo de Carnot

Graficamente, podemos representar as transformações descritas acima com a seguinte forma:

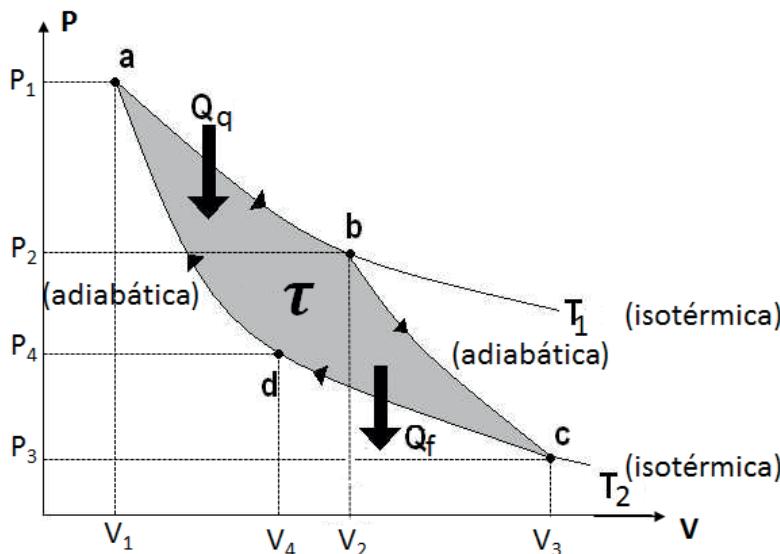


Figura 19 – Representação gráfica do ciclo de Carnot

Note que o trabalho realizado (τ) no ciclo proposto por Carnot se estabelece a partir do calor que o gás recebe da fonte quente (Q_q) e rejeita para a fonte fria (Q_f). Por consequência, o trabalho realizado pelo gás pode ser calculado pela equação

$$\tau = Q_q - Q_f$$

O rendimento de uma máquina (η) é a relação entre a energia que recebe (Q_q) e aquela que efetivamente é usada para a realização de trabalho τ .

$$\eta = \frac{\tau}{Q_q}$$

Assim, percentualmente, o rendimento é dado por

$$\eta \% = \frac{\tau}{Q_q} \times 100$$

ou

$$\eta \% = \left(1 - \frac{Q_f}{Q_q}\right) \times 100$$

Ou, ainda, se considerarmos T_q a temperatura absoluta da fonte quente e a T_f a temperatura absoluta da fonte fria.

$$\eta\% = \left(1 - \frac{T_f}{T_q}\right) \times 100$$

Uma máquina térmica que funcione segundo o ciclo de Carnot é tida como ideal, todavia, pelas equações acima, nem mesmo ela é possível obter 100% de rendimento. Portanto, podemos enunciar a 2ª Lei da Termodinâmica:

“É impossível construir uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho”. Ou seja, não é possível, nem utilizando uma máquina térmica ideal, obter 100% de rendimento.

16 ÓPTICA GEOMÉTRICA

Óptica é a parte da Física que estuda a natureza da luz e os fenômenos luminosos. Assim, podemos definir a Óptica em duas partes:

A Óptica Geométrica: estuda os fenômenos luminosos, sem preocupar-se em explicar a natureza da luz.

A Óptica Física: preocupa-se em estudar a natureza da luz.

Aqui, nós estudaremos a óptica geométrica

16.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS

Para iniciarmos nossos estudos sobre os fenômenos luminosos, sem nos aprofundarmos na natureza da luz, podemos defini-los como efeitos causados por uma forma de energia, a qual se propaga por meio de uma onda eletromagnética, capaz de impressionar nossos órgãos visuais.

Para estudarmos esses fenômenos, vamos definir outros conceitos básicos:

a) Raio de luz: É uma representação da luz. Constitui-se numa linha com indicação, por meio de uma seta, da direção e do sentido da propagação da luz.



Figura 1 – Representação gráfica de um raio de luz

b) Pincel luminoso: é a representação relativa à emissão de um conjunto de raios de luz por uma determinada fonte luminosa. O pincel luminoso pode ser classificado em:

- Paralelo: é o pincel luminoso composto por raios de luz paralelos um em relação ao outro.

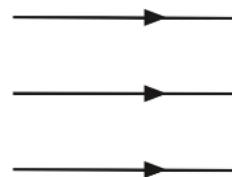


Figura 2 – Representação gráfica de um pincel luminoso

- Convergente: é o pincel luminoso composto por raios de luz que convergem para um determinado ponto.

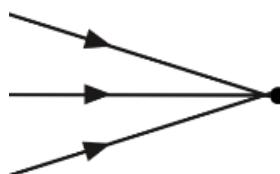


Figura 3 – Pincel de luz convergente

- Divergente: é o pincel luminoso composto por raios de luz que divergem de um determinado ponto.

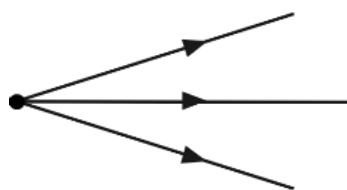


Figura 4 – Pincel de luz divergente

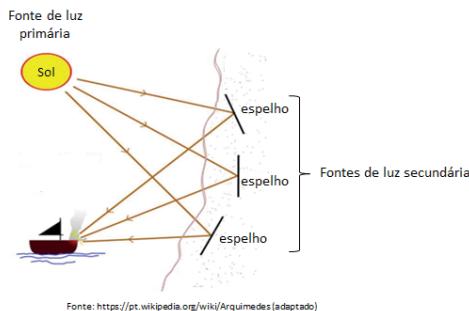
a) Fontes de luz: são corpos a partir dos quais se pode receber luz. Podem ser classificadas em primárias ou secundárias e também em puntiformes ou extensas:

- Fontes de luz primárias: são aquelas que emitem luz própria, ou seja, que são capazes de transformar em luz outras formas de energia, como, por exemplo, o Sol, lâmpadas acesas, a chama de uma vela etc.



Figura 5 – Exemplos de fontes de luz primárias

- Fontes de luz secundárias: são aquelas que refletem a luz de uma fonte luminosa primária, como, por exemplo, a Lua, planetas visíveis, outros corpos que não têm luz própria, mas que refletem a luz.



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Arquimedes_\(adaptado\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Arquimedes_(adaptado))

Figura 6 – Espelhos como exemplo de fontes de luz secundárias

- Fontes de luz puntiformes: são aquelas cujas dimensões são tão pequenas, quando comparadas à distância entre ela e o observador, que podem ser consideradas desprezíveis, ou seja, podem ser representadas por um ponto. Por exemplo: um farol de um carro visto a quilômetros de distância.



Figura 7 – Exemplos de fontes de luz puntiforme

- Fontes de luz extensas: são aquelas cujas dimensões não podem ser desprezadas, quando comparadas à distância entre ela e o observador. Por exemplo: um refletor de luz iluminando alguém próximo.

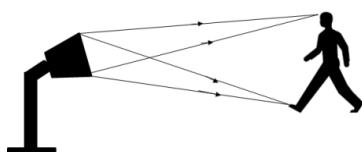


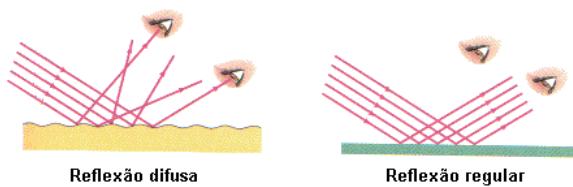
Figura 8 – Exemplos de fontes de luz extensa

b) Meios de propagação da luz: são os diferentes meios pelos quais a luz pode se propagar, podendo ser o vácuo ou quaisquer outros meios materiais. Dependendo das características desse meio, os raios de luz se comportam de maneiras diferentes. Assim, podemos classificá-los em:

- Meios transparentes: quando oferecem condições para que a luz se propague através de si, de forma regular, isto é, sem grandes distorções, possibilitando uma visão nítida.
- Meios translúcidos: quando oferecem condições para que a luz se propague através de si, porém, não de forma regular, impossibilitando uma visão nítida.
- Meios opacos: quando não oferecem condições para que a luz se propague através de si, impossibilitando a visão.

c) Fenômenos ópticos: são situações que ocorrem devido ao comportamento dos raios de luz, ao incidir sobre uma superfície que separa dois meios nos quais a luz se propaga. Os fenômenos ópticos são:

- Reflexão da luz: acontece quando os raios de luz retornam, são refletidos, paralelamente ao mesmo meio de onde estavam se propagando, não passando para o outro meio. Pode se dar de forma regular ou difusa;
- Reflexão regular: ocorre quando a superfície na qual os raios de luz incidem é bem lisa, polida, como é o caso dos espelhos, por exemplo. Esse tipo de reflexão permite uma visualização perfeita.
- Reflexão difusa: acontece quando a superfície na qual os raios de luz incidem é irregular, rugosa. Esse fenômeno não possibilita uma visualização perfeita.



Fonte: <http://papofisico.tumblr.com/>

Figura 9 – Exemplos de reflexão difusa e regular da luz

- Refração da luz: ocorre quando os raios de luz atravessam a superfície de separação e passam a se propagar no outro meio. Ao atravessarem a superfície de separação, os raios de luz se “entortam”, quer dizer, se desviam, num ângulo diferente daquele no qual incidiram.

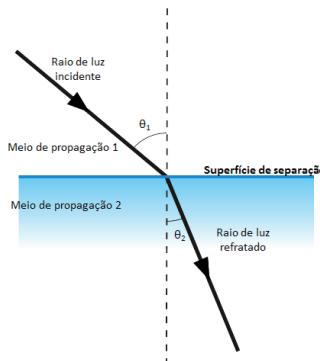
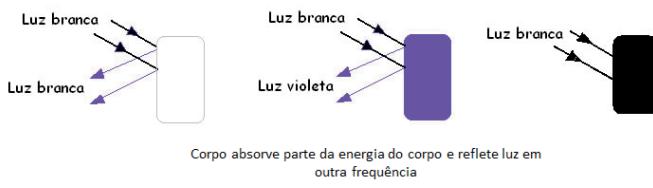


Figura 10 – Esquema de representação da refração da luz

- Absorção da luz: acontece quando os raios de luz incidentes não são nem refletidos e nem refratados. A superfície de separação absorve a energia luminosa.

A cor dos corpos pode ser explicada em parte pela absorção e em parte pela reflexão da luz. De modo bem geral, podemos explicar a cor de um corpo pela energia luminosa que ele absorve e que reflete. A luz denominada branca é, na verdade, composta por uma infinidade de cores (frequências). Assim, quando iluminamos um corpo com um pincel luminoso branco, os raios de luz incidem sobre sua superfície. Se ele refletir toda a luz, o corpo apresentará uma cor branca (branco ideal), porém se ele absorver toda luz nele incidida, o corpo não irá refletir nada, de maneira que, nesse caso, teremos o negro ideal. Contudo, o corpo pode absorver uma parte da energia luminosa e refletir um pincel luminoso de outra cor.



Fonte: <http://www.mundo.educacao.com/fisica>

Figura 11 – Absorção da luz

- Lei da Propagação Retilínea: a Lei de Propagação Retilínea da Luz afirma que a luz sempre se propaga em linha reta. Os eclipses e a formação de sombras e penumbbras são consequência direta da propagação retilínea da luz.

I – SOMBRA E PENUMBRAS

Define-se sombra como uma região do espaço desprovida de luz. Uma sombra é produzida, quando um objeto opaco impede que raios de luz provenientes de uma fonte luminosa iluminem uma determinada região do espaço.

Quando raios de luz incidem sobre um corpo opaco, definem regiões de sombra e penumbra. Observe que, enquanto a fonte de luz puntiforme só produz sombra, a fonte de luz extensa produz também penumbra. A penumbra pode ser definida como a região do espaço que é parcialmente iluminada.

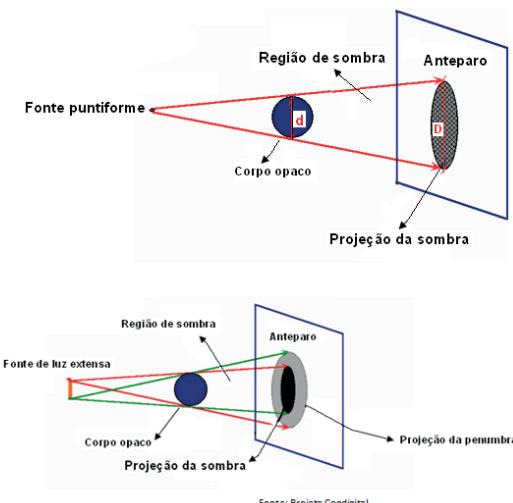


Figura 12 – Formação de sombra e penumbra

Partindo, pois, do Princípio de Propagação Retilínea da Luz, podemos estabelecer uma relação matemática para determinar o tamanho e a posição da sombra de um objeto opaco projetada em um anteparo.

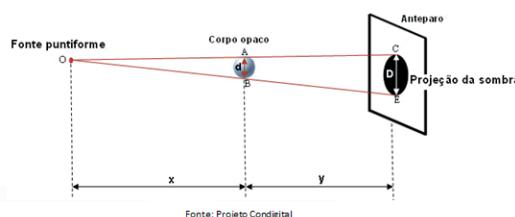


Figura 13 – Formação de sombra

A semelhança entre os triângulos ABO e CEO nos permite estabelecer a seguinte relação:

$$\frac{d}{x} = \frac{D}{(x+y)}$$

onde:

d é o diâmetro da esfera opaca.

D é o diâmetro da sombra projetada.

x é a distância entre a fonte de luz e a esfera opaca.

y é a distância entre a esfera opaca e o anteparo no qual a sombra está projetada.

II – CÂMARA ESCURA

Outra aplicação interessante do Princípio da Propagação Retilínea da Luz é o fenômeno de captura de imagens de uma Câmara Escura de orifício. A Câmara Escura de Orifício é um dispositivo que consiste em um recipiente fechado que possui um pequeno orifício. A superfície interna oposta àquela na qual está o orifício deverá ser constituída de um material semitransparente (fosco). Com a câmara escura de orifício, é possível capturarmos imagens de objetos.

Para entendermos como isso é possível, imagine um determinado objeto iluminado por uma fonte luminosa. Os raios de luz que passam pelo objeto são capturados pela caixa, ao entrarem pelo orifício, e incidem na superfície oposta feita de um material foco que serve de anteparo, na qual a imagem é projetada.

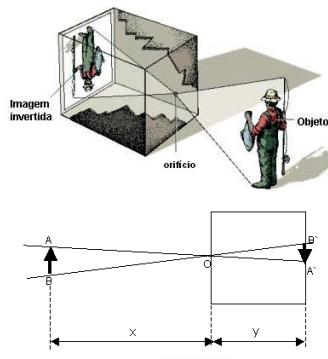


Figura 14 – Câmara escura

Como a luz se propaga em linha reta, a imagem projetada é invertida em relação ao objeto. Além disso, podemos estabelecer uma relação matemática a partir da semelhança entre os triângulos ABO e A'B'O:

$$\frac{AB}{x} = \frac{A'B'}{y}$$

onde:

AB é o tamanho do objeto

A'B' é o tamanho da imagem capturada pela câmara escura

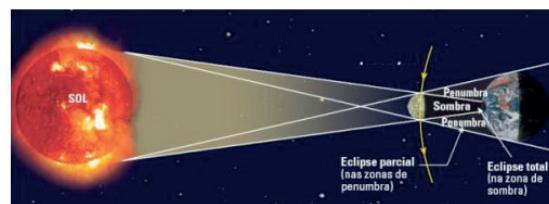
x é a distância entre o objeto e a câmara escura

y é o comprimento da câmara escura

III – ECLIPSES SOLAR E LUNAR

O fenômeno de formação de sombras e penumbra, as quais são explicadas pelo Princípio de Propagação Retilínea da Luz, é base para entendimento e análise dos fenômenos de eclipse lunar e solar.

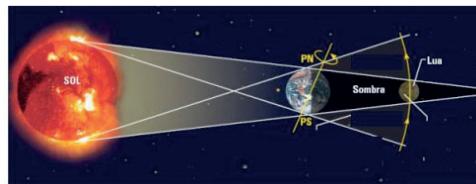
Quando a Lua, em sua órbita, fica entre o Sol e a Terra, impede que os raios solares atinjam a Terra, projetando uma sombra. Dessa forma, o Sol “desaparece” do céu. Esse fenômeno é chamado de eclipse solar ou do Sol. Como o Sol é muito grande, levando-se em conta a distância que está da Lua e da Terra, o mesmo é considerado uma fonte extensa. Por isso, temos, além da formação da sombra da Lua na Terra, também a formação de uma região de penumbra. Uma pessoa localizada na Terra na região de sombra estará observando um fenômeno de eclipse total do Sol. Já outra pessoa localizada na Terra na região de penumbra observará um eclipse parcial do Sol.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 15 – Esquema de um eclipse Solar

Já o eclipse lunar ou da Lua ocorre quando a Terra, em sua órbita, se coloca entre o Sol e a Lua. Nesse caso a Lua deixa de ser iluminada pelo Sol e, para uma pessoa localizada na Terra, ela “desaparece”, ao ser encoberta.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 16 – Esquema de um eclipse lunar

16.2 ESPERHOS PLANOS

Podemos definir espelhos planos como toda superfície plana e polida, portanto regular, capaz de refletir a luz nela incidente.

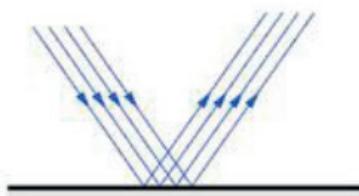
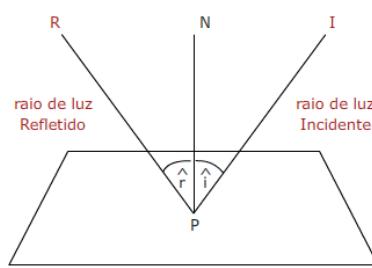


Figura 17 - Reflexão regular da luz num espelho plano

16.2.1 LEIS DA REFLEXÃO

1^a Lei: O ângulo de incidência (i) é igual ao ângulo de reflexão (r).



Fonte: Projeto Condigital

Figura 18 – O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão

2^a Lei: O Raio Incidente I, a normal à superfície refletora (N) e o raio refletido (R) estão no mesmo plano.

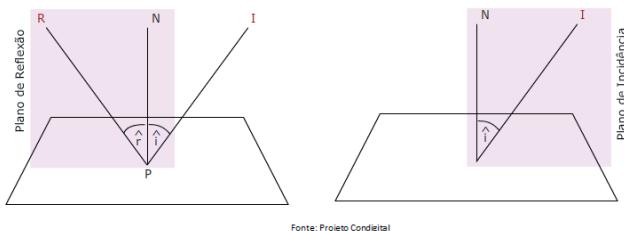


Figura 19 – A incidência e a reflexão ocorrem num mesmo plano

Considere a reta N, perpendicular à superfície refletora que denominaremos Normal à superfície. Como se pode verificar, a reta normal nos serve de referência para as medidas dos ângulos de incidência e reflexão.

16.2.2 CONSTRUÇÃO DE IMAGENS EM ESPELHOS PLANOS

Vamos estudar a construção de imagens conjugadas por um espelho plano, a partir de um ponto considerado objeto.

Tomemos, portanto, um ponto **P**, diante de um espelho plano **E**, como indica a figura a seguir:



Figura 20 - Ponto P diante de um espelho plano E

Se admitirmos raios de luz incidentes I sobre o espelho E, passando pelo ponto P, temos que considerar a existência de raios de luz refletidos R, de forma tal, que os ângulos de reflexão r serão iguais aos ângulos de incidência i (1^a Lei de Reflexão), como está indicado na figura a seguir.

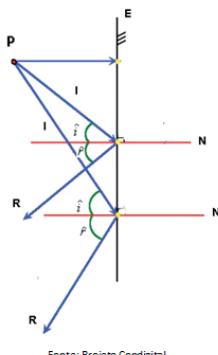


Figura 21 - Traçado de luz dos raios incidentes e refletidos

Para determinarmos o ponto imagem P' , basta que façamos um prolongamento dos raios de luz refletidos. A convergência desses pontos é P' . Observe a figura a seguir:

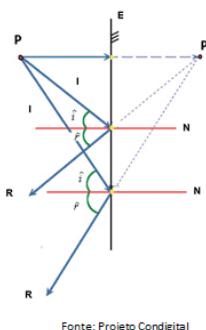


Figura 22 - Determinação gráfica do ponto imagem P'

Pode-se perceber que a distância do ponto P ao espelho E é igual à distância do espelho E ao ponto imagem P' ($PE = EP'$), ou seja, a imagem P' é simétrica ao ponto P .

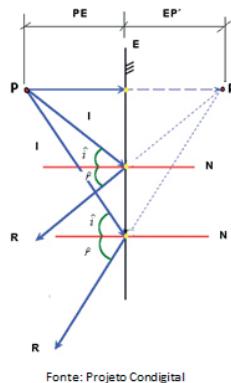


Figura 23 - Simetria do ponto imagem P' em relação ao ponto objeto P

Obs.: Como vimos, as imagens conjugadas por espelhos planos são simétricas aos objetos, isto é, a distância de cada ponto do espelho ao objeto é igual à distância da imagem ao espelho, o que nos leva a concluir que, apesar de a imagem ter o mesmo tamanho do objeto, eles não são exatamente iguais. Na verdade, a imagem fica invertida em relação ao objeto. Esse fenômeno recebe o nome de enantiomorfismo.

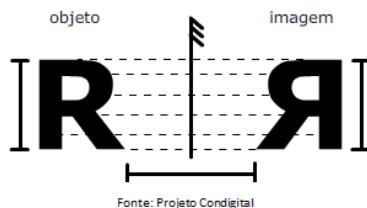


Figura 24 – Enantiomorfismo: inversão da imagem

16.2.3 TRANSLAÇÃO DE UM ESPELHO PLANO

Quando movemos um espelho, a imagem por ele conjugada também se movimenta. Considere um objeto P localizado a uma distância d_1 de um espelho E , como indica a figura a seguir.

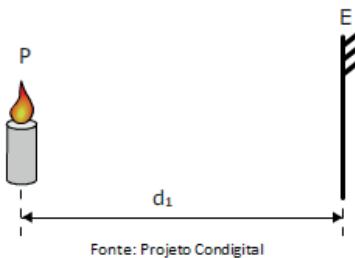


Figura 25 – Objeto P distante d_1 de um espelho E

Como espelhos planos conjugam imagens simétricas em relação ao objeto, temos que a imagem P' também se encontra a uma distância d_1 do espelho.

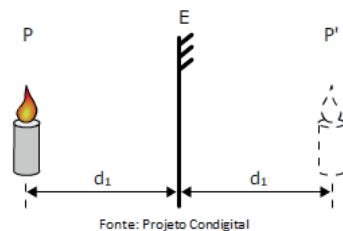


Figura 26 – Imagem P' simétrica ao objeto P

Se deslocarmos (transladarmos) o espelho de certa distância a , então teremos

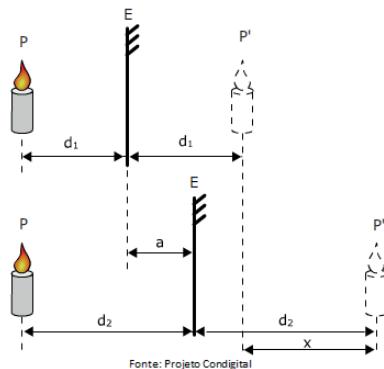


Figura 27 – Translação de espelho plano

Perceba que a distância X entre as duas posições sucessivas das imagens P' e P'' pode ser expressa por:

$$X = 2d_2 - 2d_1$$

$$X = 2(d_2 - d_1)$$

Observe a figura 27 e perceba que

$$d_2 - d_1 = a$$

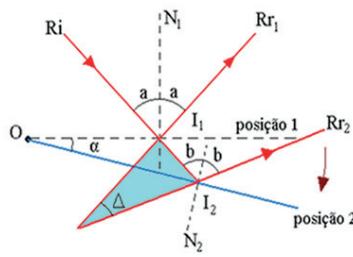
Então:

$$X = 2a$$

Dessa forma, conclui-se que o deslocamento da imagem é o dobro do deslocamento do espelho.

16.2.4 ROTAÇÃO DE UM ESPelho PLANO

Se, ao invés de deslocar o espelho de uma distância a , nós o girarmos de certo ângulo, podemos mostrar, de maneira análoga, que giramos a imagem de um ângulo $\Delta = 2\alpha$.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 28 - Rotação do espelho plano

16.2.5 ASSOCIAÇÃO DE ESpelhos PLANOS

Quando associamos dois espelhos planos de forma paralela, um em relação ao outro, ou de maneira a formarem ângulos entre si, nós podemos multiplicar o número de imagens conjugadas de um determinado objeto.

Assim consideremos dois espelhos planos E1 e E2, que formam entre si um ângulo α , como está indicado na figura a seguir.

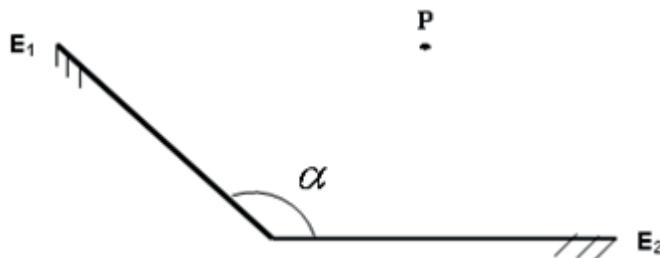


Figura 29 - Associação de espelhos planos

O número n de imagens de P que essa associação pode conjugar é igual a

$$n = \frac{360}{\alpha} - 1$$

Perceba que, se α for igual a 180° então, temos, na prática, apenas um espelho e, portanto, $n=1$, ou seja, há a conjugação de uma única imagem.

Para α igual a zero, temos que os espelhos estão paralelos e, matematicamente, teríamos uma impossibilidade. Entretanto, se pensarmos em um valor muito pequeno para α , perceberemos que n seria igual a infinito, ou seja, infinitas imagens. Isso só seria possível, se o sistema não absorvesse energia.

Essa expressão só é válida para valores de α que sejam submúltiplos de 360° . Caso contrário, o número de imagens não é inteiro.

16.3 ESPERHOS ESFÉRICOS

O nosso cotidiano está repleto de situações nas quais fazemos uso dos espelhos esféricos. Observe, nas figuras a seguir, as aplicações cotidianas dos espelhos esféricos.

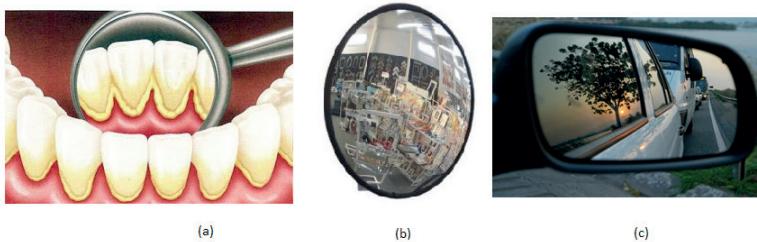


Figura 30 – Exemplos de espelhos esféricos

Fonte: <http://espehoscurvosfis.blogspot.com.br/>

Fonte: <http://www.rebravi.org.br/>

Para entendermos o que é um espelho esférico, considere uma esfera cuja superfície reflete a luz, conforme a figura 31, a seguir:

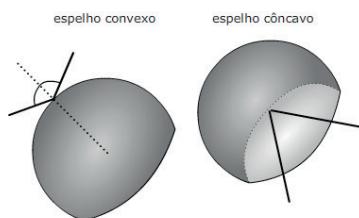


Fonte: Projeto Condigital

Figura 31 – Calota esférica sendo cortada

Dividindo essa esfera em duas partes, obtemos duas calotas esféricas: uma côncava e outra convexa.

Pode-se definir espelhos esféricos como sendo uma calota esférica com superfície refletora de luz.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 32 – espelho côncavo e espelho convexo

16.3.1 ELEMENTOS DE UM ESPELHO ESFÉRICO

A representação de um espelho pode ser feita como é mostrado na figura a seguir:

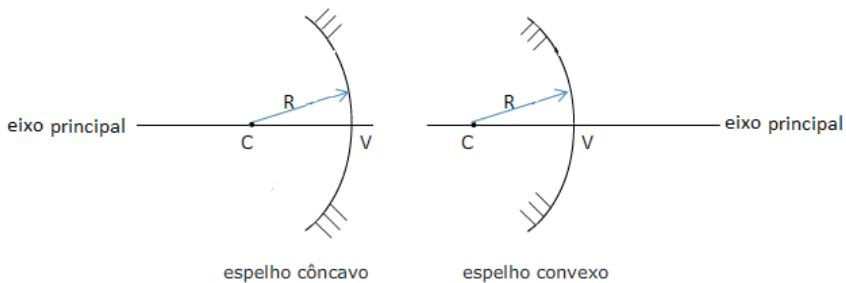


Figura 33 - Características dos espelhos esféricos

Com base na figura acima, destacamos os elementos geométricos mais importantes da representação para o estudo de um espelho esférico:

Centro de Curvatura (C): é o centro da esfera que originou a calota esférica refletora;

Raio de Curvatura (R): é o raio da esfera que originou a calota esférica refletora;

Vértice (V): é o ponto máximo da extremidade da calota esférica refletora; e

Eixo principal: é a linha que passa pelo vértice e pelo centro de curvatura da calota esférica refletora.

16.3.2 Os focos de um espelho esférico

Para que uma imagem de um determinado ponto objeto possa ser formada com nitidez, é preciso que a luz, a qual é refletida por um espelho ou desviada por uma lente, forneça um único ponto imagem. Quando isso não acontece, há uma distorção ou aberração da imagem, pois há a formação daquilo que chamamos de cáustica.

O termo cáustica, do ponto de vista matemático, refere-se a uma curva ou superfície. Mostramos, na figura a seguir, a curva ou superfície matemática denominada cáustica gerada por raios de luz refletidos por espelhos côncavos e convexos.

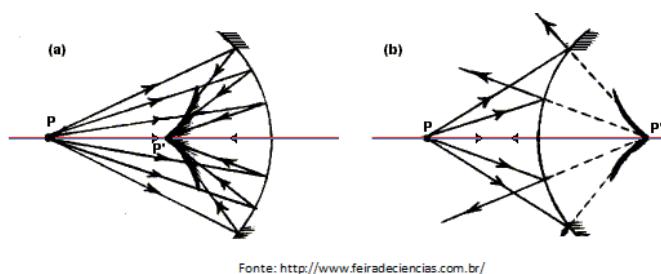


Figura 34 – Formação de cáustica em espelhos esféricos

Perceba que, ao invés de os raios convergirem para um único ponto, ou seja, para o foco, há a formação de vários pontos focais, gerando uma superfície dos raios de luz refletidos. Essa superfície, chamada de cáustica, gera imagens distorcidas.

A fim de que um espelho esférico forme uma imagem nítida, é necessário que todos os raios de luz, que incidam paralelamente sobre espelho, sejam refletidos, ou seus prolongamentos passem por um único ponto: o foco (F).

Nafiguraaseguir,noteque,noespelhocôncavo,osraiosparalelosdeluztendem aconvergirparaofocodoespelho. Porisso,dizemosque,nosespelhoscôncavos,ofocoéreal. No caso dos espelhos convexos, os raios de luz tendem a divergir, contudo, os prolongamentos dos raios incidentes paralelos tendem para o foco. Em razão disso, concluímos que, nos espelhos convexos, o foco é virtual.

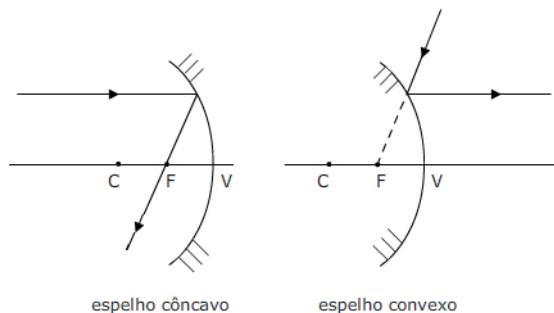


Figura 35 – ponto focal em espelhos esféricos

Mas quais condições são necessárias para que o espelho esférico produza um único ponto focal?

Para isso, é preciso que o espelho seja estigmático, isto é, que atenda às condições de estigmatismo estabelecidas por Gauss:

a) A abertura do espelho não pode exceder 10° (dez graus). Observe que, para que o ângulo de abertura seja menor que 10° , o espelho ou a lente tende a perder a sua forma esférica.

PARA QUE O ÂNGULO DE ABERTURA SEJA MENOR QUE 10° ,
O ESPELHO OU A LENTE TENDE A PERDER A SUA FORMA ESFÉRICA

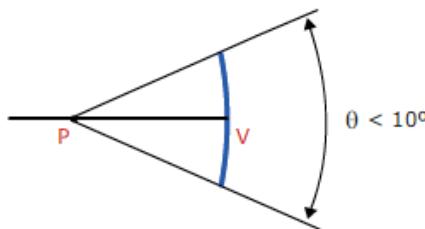


Figura 36 – Espelho estigmático: ângulo de abertura deve ser menor que 10°

b) Os raios incidentes no espelho ou na lente precisam ser paraxiais, ou melhor, são raios próximos ao eixo principal e que não devem apresentar grandes inclinações em relação a ele.

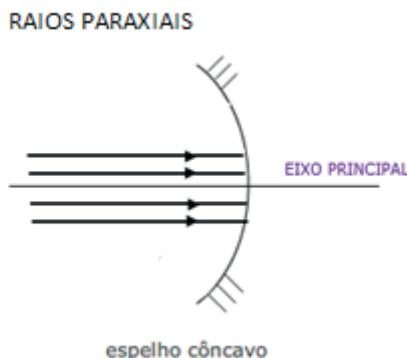


Figura 37 - Raios de luz paraxiais

Para espelhos esféricos que obedecem às condições de estigmatismo de Gauss, a distância focal (f) é a metade da distância entre o vértice (V) e centro de curvatura (C). Ou seja:

$$f = \frac{CV}{2} = \frac{R}{2}$$

16.3.3 FORMAÇÃO DE IMAGENS EM ESPelho ESférico

Para representarmos a formação de imagens em espelhos esféricos, precisamos levar em conta a trajetória dos raios de luz. Assim, três regras são importantes:

1^a – Um raio de luz paralelo e próximo ao eixo principal, após a reflexão, sempre passará pelo foco do espelho esférico.

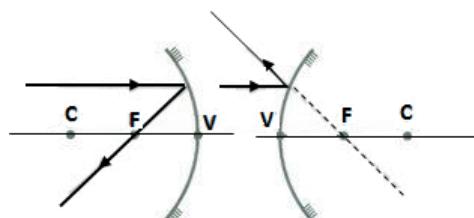


Figura 38 – Raio de luz paralelo ao eixo principal, após a reflexão, sempre passa pelo foco

2^a – Todo raio de luz incidente que passa pelo centro de curvatura C, após a reflexão, volta sobre si mesmo.

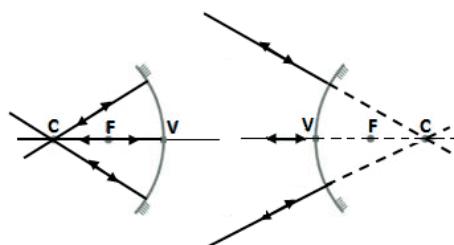


Figura 39 – Raio de luz incidente que passa por C, reflete sobre si mesmo

3^a – Todo raio de luz incidente que passa pelo foco F refletirá numa direção paralela ao eixo principal do espelho esférico.

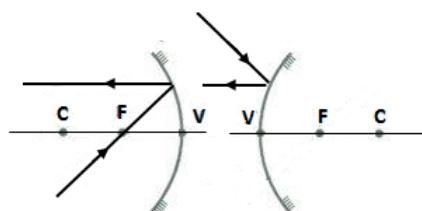


Figura 40 – Raio de luz incidente que passa por F, após a reflexão, propaga-se paralelamente ao eixo principal

16.3.4 CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS FORMADAS EM ESPELHO ESFÉRICO

A imagem formada nos espelhos esféricos pode ser real ou virtual, direita ou invertida e maior ou menor que o objeto.

Nos espelhos côncavos, temos:

- a) Objeto antes do centro de curvatura:

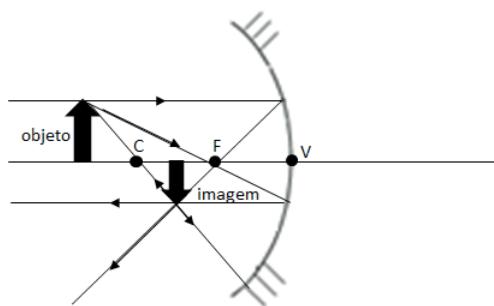


Figura 41 – Imagem com o objeto antes do centro de curvatura

A imagem é: real (formada pelos raios de luz), invertida e menor que o objeto.

- b) Objeto sobre o centro de curvatura:

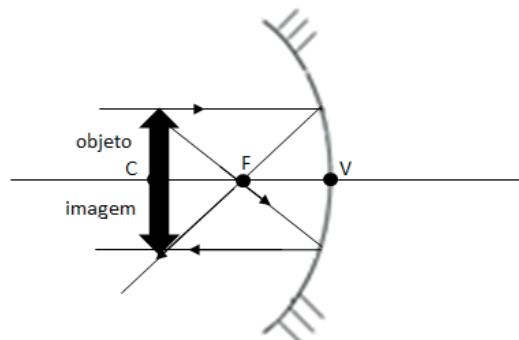


Figura 42 – Imagem com o objeto sobre o centro de curvatura

A imagem é real (formada pelos raios de luz), invertida e do mesmo tamanho que o objeto.

c) Objeto entre o centro de curvatura e o foco:

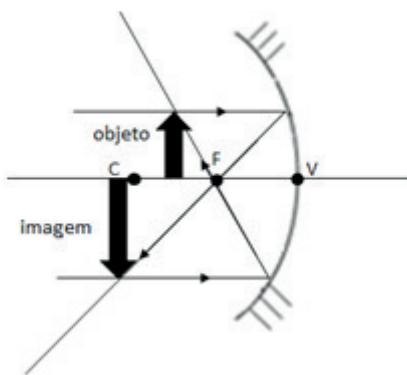


Figura 43 – Imagem com o objeto entre o centro de curvatura e o foco

A imagem é real (formada pelos raios de luz), invertida e maior que o objeto.

a) Objeto no foco:

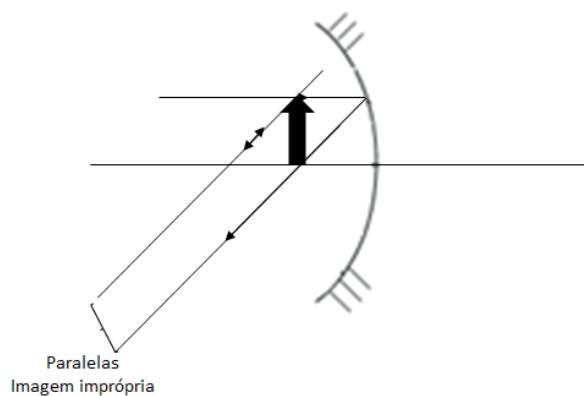


Figura 44 – Imagem imprópria: o objeto é colocado sobre o foco

b) Objeto entre o foco e o vértice:

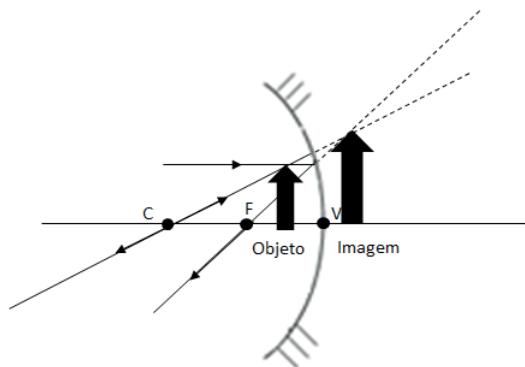


Figura 45 – Imagem com o objeto colocado entre o foco e o vértice

A imagem é virtual (formada pelos prolongamentos dos raios), direita e maior que o objeto.

Nos espelhos convexos:

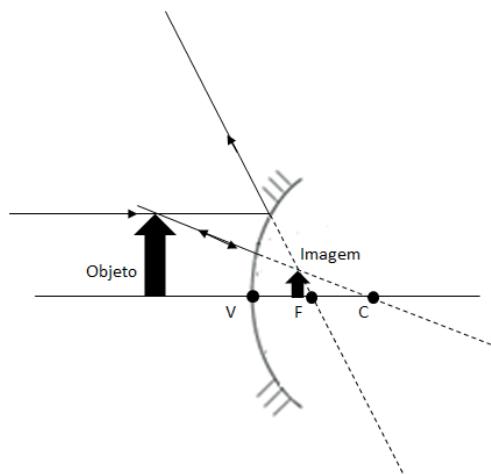


Figura 46 – Imagem no espelho convexo

A imagem é virtual (formada pelos prolongamentos dos raios de luz), direita e menor que o objeto.

16.3.5 A EQUAÇÃO DE CONJUGAÇÃO DE GAUSS

A equação de conjugação de Gauss relaciona a posição do objeto (p) com a posição da imagem (p') e a distância focal (f). Por isso, temos:

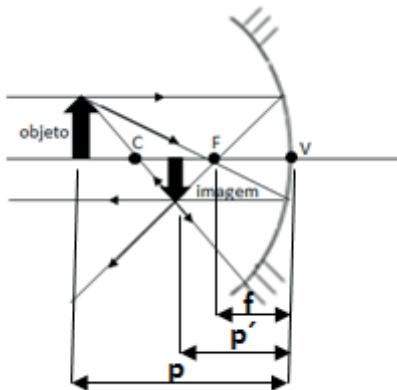


Figura 47 – Imagem conjugada por espelho côncavo

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

O uso dessa equação envolve, necessariamente, a definição de um sistema de referências para que se possa atribuir sinal, positivo ou negativo, diferenciando-se o real (+) do virtual (-).

Nesse sentido, considere um espelho esférico cujo eixo principal é o eixo das abcissas, orientado no sentido contrário ao da luz incidente no espelho. Dessa forma, a frente do espelho corresponde aos valores de abcissa positiva, ou seja, local onde estão objetos e imagens reais. Portanto, a região localizada atrás do espelho corresponde aos valores de abcissa negativa, onde se localizam objetos e imagens virtuais. Para a definição do eixo das ordenadas, considere uma reta vertical que passe no vértice do espelho, orientada para cima. Assim, o objeto ou a imagem que estiver acima do eixo principal do espelho terá ordenada positiva e o que estiver abaixo dele terá ordenada negativa.

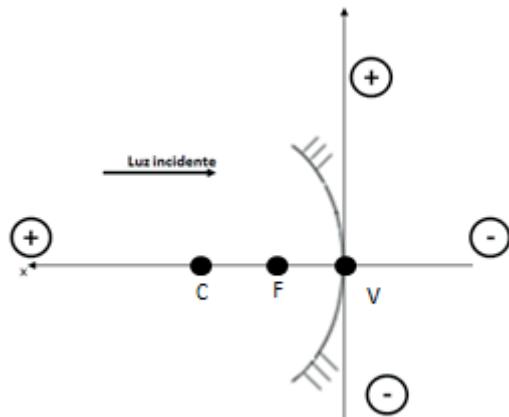


Figura 48 – Definição de referencial

Observe que, de acordo com a convenção adotada, para o espelho côncavo, o centro de curvatura C e o foco F são positivos, ou seja, reais. Para o espelho convexo, o centro de curvatura C e o foco F são negativos, isto é, virtuais.

16.3.6 A EQUAÇÃO DO AUMENTO LINEAR TRANSVERSAL

No estudo da representação da conjugação de imagens por espelhos esféricos, vimos que a altura da imagem pode ser igual, maior ou menor que a do objeto. Considerando y , a altura do objeto, y' a altura da imagem e A , o aumento linear transversal da imagem, temos que:

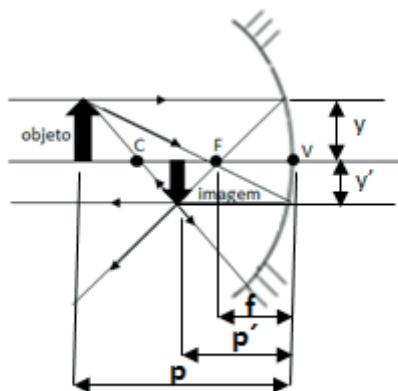


Figura 49 – Aumento da imagem

$$A = -\frac{y'}{y}$$

ou

$$A = -\frac{p'}{p}$$

Obs.: com relação à equação acima, perceba que:

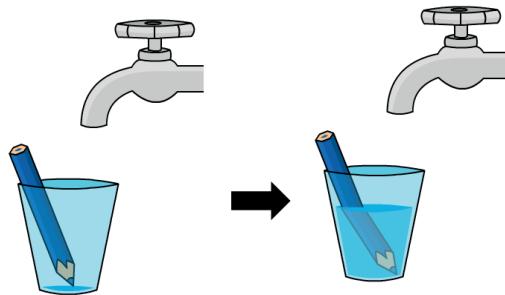
- a) Quando p e p' têm o mesmo sinal, $A < 0$, o que indica que a imagem é invertida em relação ao objeto.
- b) Quando p e p' têm sinais opostos, temos $A > 0$, o que indica que a imagem é direita em relação ao objeto.

16.4 LEIS DA REFRAÇÃO DA LUZ

Como já verificamos, a refração da luz é o fenômeno luminoso no qual um feixe de luz incidente sobre uma superfície que separa dois meios materiais tende a atravessá-la e a se propagar num meio material diferente daquele em que foi emitido.

Ao atravessar a superfície de separação e se propagar em outro meio, o feixe de luz apresenta uma mudança em sua direção, alterando a maneira pela qual percebemos os objetos.

Nesse caso, afirmamos que o feixe de luz foi refratado, quer dizer, desviado quando se propagou de um meio material a outro. Assim, por exemplo, um lápis, ao ser colocado dentro de um copo com água, parece se “entortar”.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 50 – refração da luz

Pode-se verificar experimentalmente que uma parte do raio incidente é refletida pela superfície de contato e outra parte é refratada, isto é, passa para o outro meio, mas com a direção alterada.

Em relação à reta normal à superfície de contato:

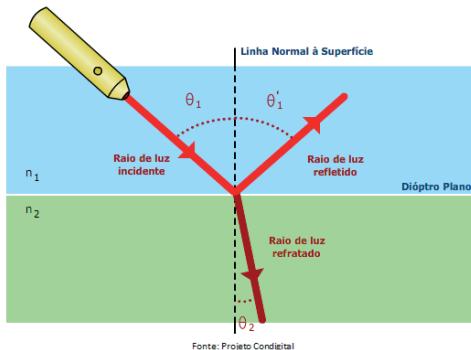


Figura 51 – Esquema de raios de luz refletido e refratado

Aliás, é por isso que chamamos o fenômeno de refração, pois, segundo o *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa*, *refratar* significa desviar algo de sua primitiva direção. Isso acontece porque o raio de luz, ao encontrar um meio material mais denso, sofre uma maior resistência à sua propagação, alterando sua velocidade. Dessa maneira, é comum utilizar o termo *refringência* para se referir à maior ou menor resistência que um meio oferece à propagação da luz. A refringência, ou índice de refração, n , pode ser definida como sendo a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio considerado

Assim, quando um raio de luz passa a se propagar num meio mais refringente do que aquele no qual estava se propagando, tende a se aproximar da linha normal à superfície.

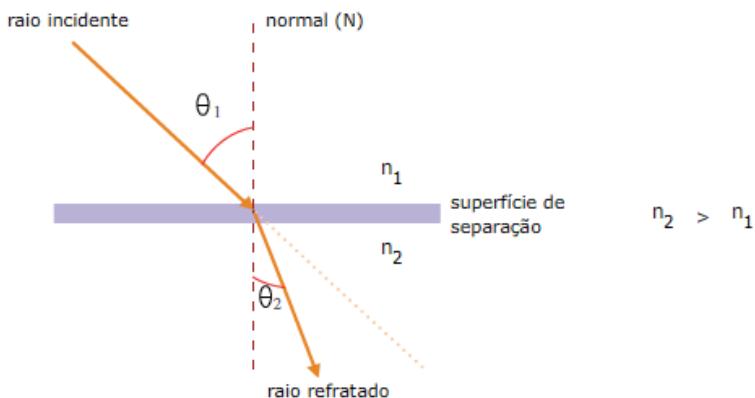


Figura 52 – Raio de luz propagando-se num meio mais refringente do que aquele no qual estava se propagando

Se o raio luminoso passa a se propagar num meio menos refringente do que aquele no qual estava se propagando, tenderá a se afastar da linha normal à superfície.

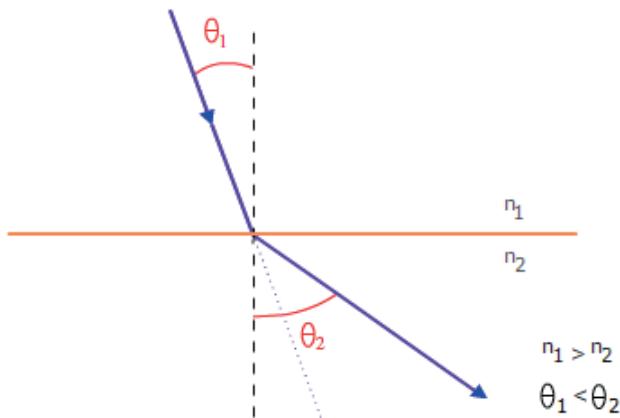


Figura 53 – Raio de luz propagando-se num meio menos refringente do que aquele no qual estava se propagando

16.4.1 LEI DE SNELL-DESCARTES

A relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração é dada a partir da seguinte expressão:

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

onde as constantes n_1 e n_2 são denominadas índices de refração dos meios 1 e 2, respectivamente.

Essa Lei é conhecida por Lei de Snell-Descartes. Ao mudar de meio, a luz altera sua velocidade de propagação. O índice de refração quantifica essa mudança. Dessa forma, temos:

$$n = \frac{c}{v}$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade da luz para um comprimento de onda específico num certo meio, cujo índice de refração é n .

Assim, por definição, o índice de refração da luz no vácuo é considerado como sendo igual a 1, que é praticamente aquele obtido para o ar: 1,00029 (temperatura de 15°C e 1atm de pressão). De fato, tratamos o índice de refração de um material de forma relativa, comparando-o com o do vácuo (ou ar), ou seja, quantas

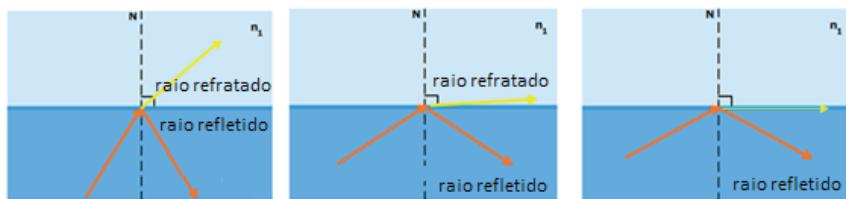
vezes o seu índice de refração é maior do que aquele do vácuo e, portanto, uma grandeza adimensional, que é derivado da expressão

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

16.4.2 REFLEXÃO TOTAL

Os fenômenos de reflexão e refração podem ocorrer conjuntamente. Entretanto, existe uma situação limite em que, aparentemente, não há refração, apenas reflexão. É o caso no qual o ângulo de incidência atinge um valor limite.

O ângulo de incidência atinge um valor limite quando um raio de luz, ao passar a se propagar de um meio mais refringente, n_2 , para um meio menos refringente, n_1 ($n_2 > n_1$), tem seu ângulo de refração igual a 90° . Nesse caso, parece não existir refração, pois o raio refratado se encontra paralelo à superfície de separação dos meios:



Fonte: Projeto Condigital

Figura 54 – Ângulo limite e reflexão total

A partir desse ângulo limite, ou seja, quando o ângulo de incidência for maior do que o ângulo limite, só há ocorrência da reflexão e não mais refração. Nesse caso, dizemos que acontece uma reflexão total.

16.4.3 DIOPTROS PLANOS

Dióptros planos são sistemas constituídos de dois meios homogêneos e transparentes, separados por uma superfície plana.

Por causa do desvio sofrido pelo raio de luz ao mudar de meio, observa-se a imagem (p') em posição diferente do objeto (p).

Assim, considerando apenas os raios de luz incidentes que atingem a superfície de separação dos meios com ângulos pequenos ($\theta_i < 5^\circ$) e adotando como referência o eixo das ordenadas (y) orientado positivamente para baixo, contrário à luz incidente, temos que:

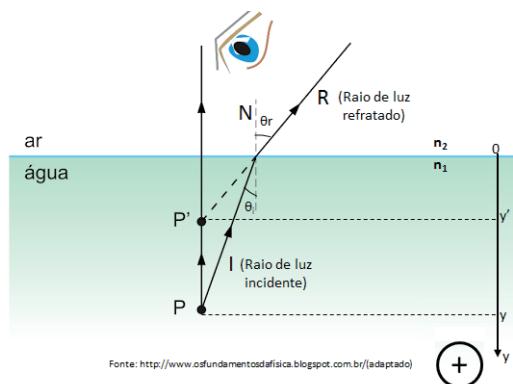


Figura 55 – Refração da luz

$$\frac{n_1}{y} = \frac{n_2}{y'}$$

Como $y = p$ e $y' = p'$, temos:

$$\frac{n_1}{p} = \frac{n_2}{p'}$$

a) Lâminas de faces paralelas:

Lâminas de faces paralelas se constituem na associação de dois dióptros planos, como, por exemplo, ar/vidro e vidro/ar.

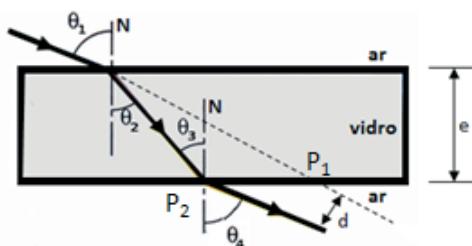


Figura 56 – Lâmina de faces paralelas

O raio de luz, ao atravessar as lâminas de faces paralelas, sofre um deslocamento, ou seja, espera-se o raio de luz emergir no ponto P₁, no entanto, ele surge em P₂. Note que ($\theta_1 = \theta_4$) e que ($\theta_2 = \theta_3$). Sendo (e) a espessura da lâmina de faces paralelas, podemos calcular o deslocamento (d) a partir da equação

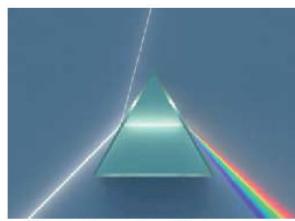
$$d = e \cdot \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2}$$

b) Prismas

Um prisma é um dioptro formado por faces não-paralelas. Diferentemente das lâminas de faces paralelas, os prismas não apenas deslocam os raios de luz, mas também os desviam. Têm diferentes aplicações práticas, como na confecção de binóculos, telescópios, câmeras fotográficas etc.

Outra aplicação comum dos prismas é a dispersão da luz branca. A luz branca é composta por diferentes frequências, por isso é chamada de luz policromática, pois contém uma infinidade de cores. Por essa razão, é possível separar a luz branca, isto é, policromática, em seus diferentes comprimentos de onda.

Ao incidir na superfície de separação de dois meios, cada luz monocromática que constitui a branca passará a se deslocar em direções diferentes, promovendo o fenômeno denominado dispersão da luz. Teoricamente, a dispersão da luz branca ocorreria para qualquer refração. Contudo, como a diferença dos índices de refração dos materiais é pequena, esse fenômeno só é observado em determinados prismas.



Fonte: <http://www.informacionopticas.com>.

Figura 57 – Prisma

Para estudarmos a trajetória de um raio de luz em um prisma, vamos considerar que um raio de luz monocromático, o qual se propaga num meio material cujo índice refração seja n_1 , incida sobre um prisma, cujo ângulo de abertura é A (também chamado de ângulo de refringência) e o índice de refração é n_2 .

Sendo $n_1 < n_2$, podemos representar a trajetória do raio de luz da seguinte forma:

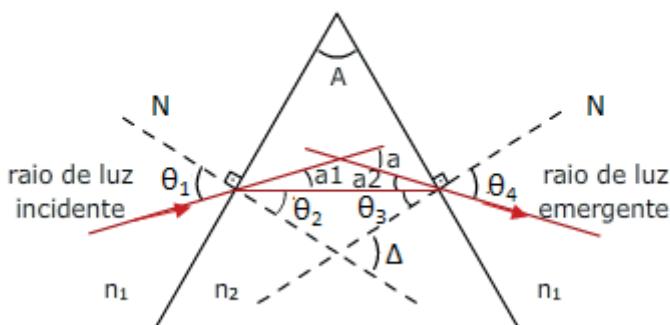


Figura 58 – Representação do raio de luz num prisma

Logo, é possível demonstrar que o desvio Δ pode ser calculado por:

$$\Delta = \theta_1 + \theta_2 - A$$

Sendo:

$$A = \theta_2 + \theta_3$$

OBS.: Já sabemos que, quando um raio de luz incide perpendicularmente sobre uma superfície, ele não sofre desvio. Sabemos também que, se o ângulo de incidência for maior que o ângulo limite do meio material no qual um raio de luz incide, tem-se a reflexão total. Portanto, quando essas duas condições acontecem, temos um prisma de reflexão total.

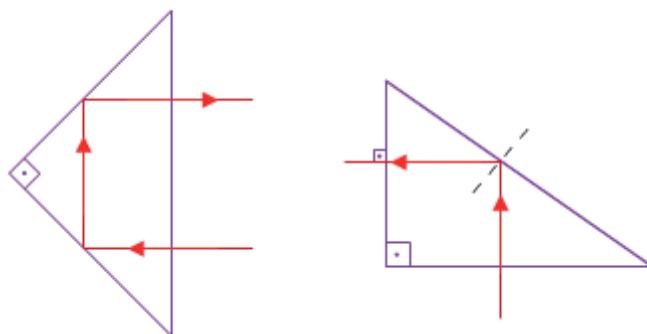


Figura 59 – Prisma de reflexão total

Os prismas de reflexão total são utilizados como uma opção aos espelhos que se degradam com o tempo e prejudicam a qualidade da luz refletida.

16.5 LENTES ESFÉRICAS

Lentes são meios materiais transparentes, quer dizer, que permitem a passagem da luz. Normalmente, são feitas de vidro ou de plástico (acrílico ou policarbonato). Mas o que as torna tão especiais? É a capacidade que têm de “entortar” a luz, ou seja, de refratá-la.

Dependendo de seu formato, as lentes desviam os raios de luz de diferentes maneiras, influenciando decisivamente a formação das imagens. Para entendermos como isso acontece, vamos, primeiramente, conhecer o formato das lentes.

Consideremos uma esfera feita de vidro.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 60 – Esfera de vidro

Admita agora que você fatie essa esfera, cortando-as em pedaços. Dependendo da maneira como for feito esse corte, serão obtidos diferentes formatos de lentes esféricas.

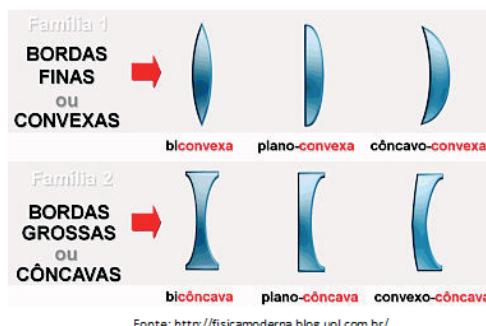
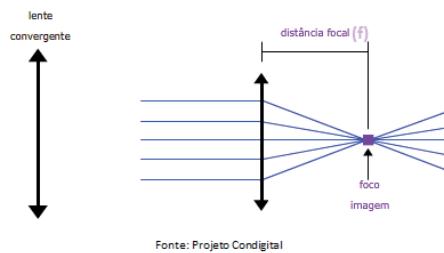


Figura 61 – Perfis de lentes esféricas

As lentes de bordas finas tendem a desviar os raios de luz que passam por elas, de modo que converjam para um determinado ponto. Por isso, esses tipos de lentes são chamadas convergentes. O ponto para onde os raios paralelos de luz convergem é chamado de foco da lente e a distância desse ponto ao centro da lente é denominada distância focal.

Como as lentes convergentes têm bordos finos, são representadas por linhas cujas extremidades são setas apontando para fora, como indicadas na figura a seguir:

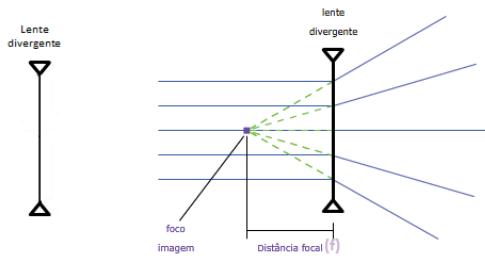


Fonte: Projeto Condigital

Figura 62 – Lente convergente

As lentes de bordos grossos tendem a desviar os raios paralelos de luz que passam por elas, de sorte que divirjam de um determinado ponto. Assim, esses tipos de lentes são chamados de divergentes. O ponto de onde os raios paralelos de luz divergem é chamado de foco da lente e a distância desse ponto ao centro da lente é denominada distância focal.

Como as lentes divergentes têm bordos grossos, são representadas por linhas cujas extremidades são setas apontando para dentro, como indicadas na figura a seguir:



Fonte: Projeto Condigital

Figura 63 – Lente divergente

16.5.1 ELEMENTOS DE UMA LENTE ESFÉRICA

Além do foco, as lentes apresentam outras características úteis para a compreensão de seu comportamento óptico.

a) Centro e raios de curvatura

Como vimos, uma lente esférica é composta por pelo menos uma superfície esférica. No caso de uma lente biconvexa, na qual temos duas faces esféricas, temos que C_1 e C_2 são os centros de curvatura das calotas esféricas 1 e 2, respectivamente, e que R_1 e R_2 são os raios de curvatura das calotas 1 e 2, respectivamente.

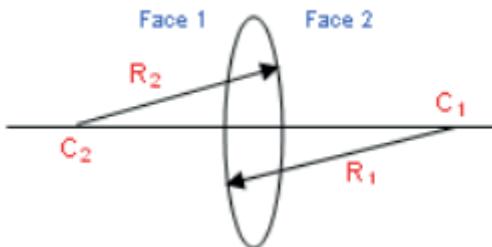


Figura 64 – Raios e centros de curvatura de uma lente biconvexa

No caso de umas das superfícies da lente não ser esférica, isto é, ser plana, o raio de curvatura dessa superfície será considerado infinito. Por convenção, adotou-se o seguinte referencial para os raios de curvatura: para faces convexas, os raios de curvatura são positivos e, para faces côncavas, os raios de curvatura são negativos.

b) Centro óptico

É o ponto (O) pelo qual qualquer raio de luz atravessa a lente, sem sofrer desvio.

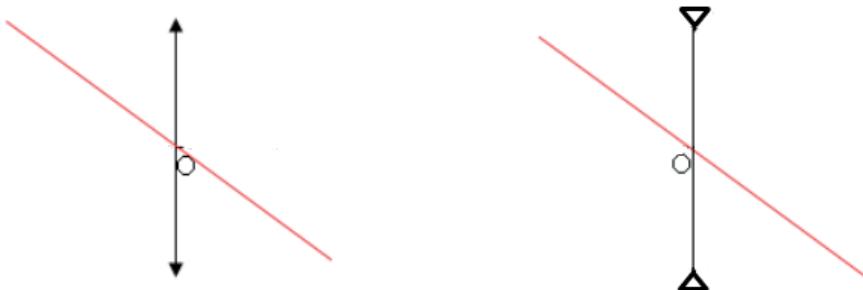


Figura 65 – Centro óptico de uma lente

c) Eixo principal

É a linha horizontal que passa pelo centro óptico da lente.

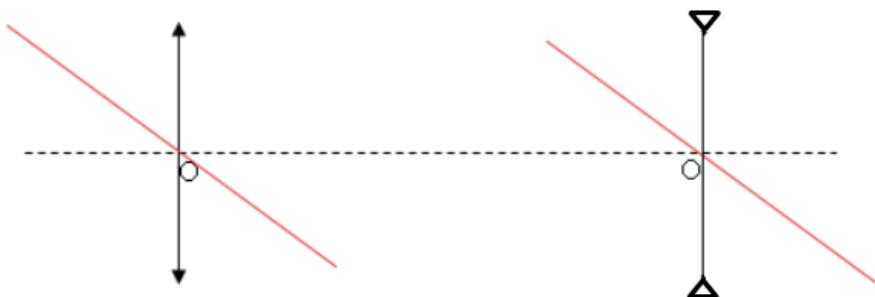


Figura 66 – Eixo Principal de uma lente

16.5.2 VERGÊNCIA, CONVERGÊNCIA OU GRAU DE UMA LENTE

É muito comum, quando ouvimos falar que alguém faz uso de óculos, perguntarmos qual é o grau da lente que usa. Esse termo, grau, que habitualmente usamos para nos referir às lentes, diz respeito ao resultado da vergência de uma lente (C), que significa a capacidade que essa lente possui de alterar as dimensões da imagem de um objeto. O cálculo da vergência ou convergência (C) de uma lente é feito a partir de sua distância focal (f):

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

Se a distância focal for dada em metros, a vergência da lente será dada em m^{-1} ou dioptrias (di).

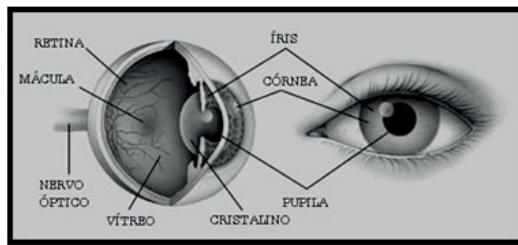
Outra maneira de calcular a vergência de uma lente esférica é mediante a chamada equação dos fabricantes de lentes:

$$C = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

onde n é o índice de refração da lente e R_1 e R_2 são os raios de curvatura da lente. Essa equação parte da consideração de que a lente está imersa no ar, cujo índice de refração foi adotado como sendo igual a um.

16.6 O OLHO HUMANO E OS DEFEITOS DA VISÃO

O globo ocular humano é muito parecido com uma câmara escura, ou seja, se constitui de uma câmara esférica dotada de um sistema de lentes:



Fonte: <http://laboratoriorigor.com.br/anatomia.html>.

Figura 67 – Olho humano

Córnea: é uma membrana transparente cuja superfície apresenta uma curvatura que nos permite focalizar um objeto, pois desvia os raios paralelos que chegam aos olhos, convergindo-os para dentro do olho.

Íris e Pupila: a íris é uma membrana circular que apresenta um orifício central denominado pupila. A íris é composta por músculos que controlam a abertura e o fechamento da pupila, a qual, por sua vez, controla a entrada de luz no olho.

Cristalino: é uma lente biconvexa localizada atrás da íris. Sua função é focalizar o feixe de luz sobre a retina. Mediante a ação de um determinado músculo (músculo ciliar), o cristalino modifica sua forma e, portanto, altera seus raios de curvatura e, consequentemente, modifica sua distância focal. Assim, o cristalino é capaz de acomodar nossa visão, de forma a permitir que possamos focalizar objetos próximos e também objetos distantes.

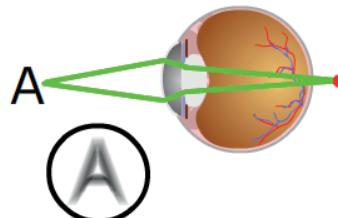
Retina: é uma camada que possui milhares de células fotossensoras, isto é, células que são sensíveis à luz e enviam informações ao cérebro. Essas células são de dois tipos: os cones, os quais possibilitam que enxerguemos colorido, e os bastonetes, células que permitem a ver o preto e branco.

Nervo óptico: é um sistema de fibras nervosas cuja função é conduzir as imagens captadas pelas células que constituem a retina até o cérebro.

Como podemos perceber, o olho é um sistema óptico extraordinariamente sofisticado, cuja principal característica é focalizar os raios de luz na retina. Por isso, todo olho normal ou emétreope (sem defeitos) deve ser capaz de focalizar os raios de luz paralelos que chegam até ele na retina.

Alterações nessa capacidade do olho caracterizam defeitos na visão. Dentre eles, os mais comuns são:

Hipermetropia: É o defeito da visão característico de globos oculares curtos. Dessa forma, a focalização dos raios de luz se dá depois da retina.



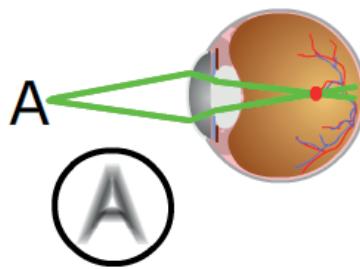
Fonte: Projeto Condigital

Figura 68 – Hipermetropia

A correção desse defeito se dá mediante o uso de lentes convergentes.

Presbiopia: É um caso particular da Hipermetropia. De origem grega – *presi* (velho, senil) e *opia* (olho, visão) –, presbiopia é uma palavra que designa o defeito de visão provocado pelo envelhecimento. À medida que envelhecemos, os músculos ciliares vão perdendo a capacidade de promover a acomodação do cristalino, o que não permite que os raios de luz sejam focalizados sobre a retina.

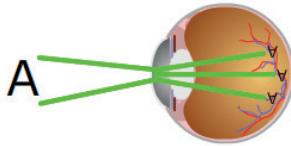
Miopia: A miopia é o contrário da hipermetropia. Esse defeito da visão ocorre em globos oculares mais alongados. Por isso, a focalização dos raios de luz ocorre antes da retina. Para corrigir esse problema, utiliza-se uma lente divergente.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 69 – Miopia

Astigmatismo: O astigmatismo é um defeito na visão devido a uma deformação desigual nos raios de curvatura das faces da córnea. Essa deformação faz com que haja mais de um foco. Para corrigir esse problema, usam-se lentes cilíndricas.

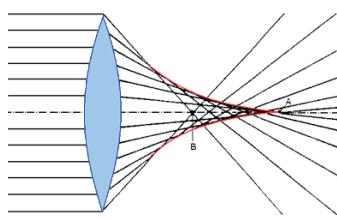


Fonte: Projeto Condigital

Figura 70 – Astigmatismo

16.7 CONDIÇÕES DE ESTIGMATISMO DE UMA LENTE ESFÉRICA

Assim como os espelhos esféricos, a lentes esféricas também devem respeitar algumas condições para evitar a formação da cáustica.



Fonte: <http://feirade ciencias.com.br>

Figura 71 – Formação da cáustica em lentes esféricas

Gauss definiu as seguintes condições para que uma lente esférica possa ser considerada estigmática:

I – As lentes esféricas devem ser delgadas (finas), isto é, sua espessura deve ser considerada desprezível em relação às distâncias contempladas;

II – os raios de luz incidentes devem ser todos paraxiais, ou seja, devem ter pequena inclinação em relação ao eixo principal.

16.8 FOCOS DE UMA LENTE ESFÉRICA

Diferentemente dos espelhos esféricos, as lentes esféricas não têm apenas um, mas dois focos – um foco objeto (F) e um foco imagem (F') –, porque os raios de luz atravessam as lentes. A distância focal (f) é a distância entre o centro óptico da lente até cada um dos focos.

É possível definir, ainda, os pontos antiprincipais (C e C') como pontos localizados sobre o eixo principal da lente, simétricos em relação ao eixo óptico, de tal forma que, se um objeto for colocado em C , irá gerar uma imagem (real ou

virtual) em C' , que terá o mesmo tamanho do objeto. Nesse caso, o aumento linear transversal $A = -1$ (o sinal negativo é devido à circunstância de a imagem e o objeto terem a mesma natureza, portanto, sendo a imagem invertida em relação ao objeto). A distância de C até o centro óptico é igual a duas vezes a distância focal, ou seja, igual a $2f$.

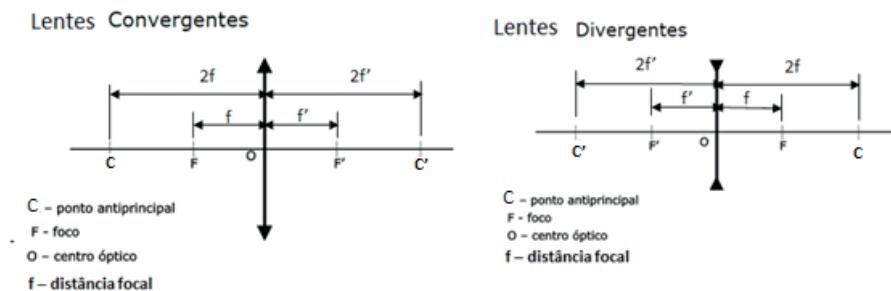


Figura 72 – Elementos de lentes divergentes

Para essas lentes, as quais satisfazem as condições de Gauss, vale a equação:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

16.9 REFERENCIAL DE GAUSS PARA O ESTUDO DAS LENTES

Adotaremos referenciais diferentes para imagem e para objeto: o eixo das abscissas coincide com o eixo principal das lentes esféricas, de forma que a origem do eixo das abscissas coincide com o centro óptico da lente esférica. Entretanto, a orientação positiva é definida diferentemente, para o objeto e para a imagem. O sentido positivo para o objeto é contrário ao sentido do raio de luz incidente. Isso tem por objetivo manter os referenciais com a mesma convenção anterior: objetos e imagens reais têm abscissas positivas e objetos e imagens virtuais têm abscissas negativas.

16.10 FORMAÇÃO DE IMAGENS NAS LENTES ESFÉRICAS

Para representarmos a formação de imagens em lentes esféricas, precisamos levar em conta a trajetória dos raios de luz. Quatro regras são importantes:

Para as lentes esféricas convergentes:

1^a – Um raio de luz paralelo e próximo ao eixo principal, após a refração, sempre passará pelo foco imagem da lente esférica.

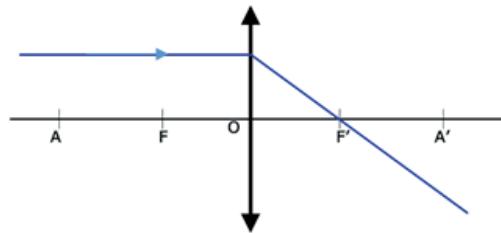


Figura 73 – Raio de luz paralelo ao eixo principal é refratado pela lente convergente passando pelo foco

2^a – Todo raio de luz incidente que passa pelo foco objeto se refrata paralelamente ao eixo principal da lente.

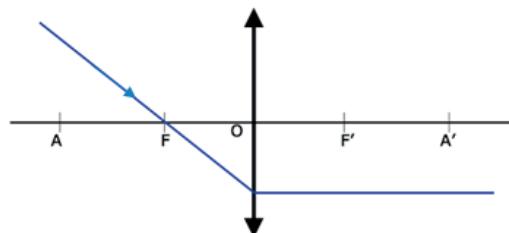


Figura 74 – Raio de luz que passa pelo foco e refrata num lente convergente passa paralelo ao eixo principal

3^a – Todo raio de luz incidente que passa pelo centro óptico da lente não sofre desvio.

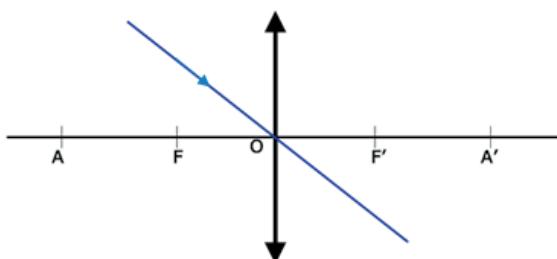


Figura 75 – Raio de luz que passa pelo centro óptico de um lente convergente não difrata

4^a – Todo raio de luz incidente que passa pelo ponto antiprincipal objeto, depois da refração, passará pelo ponto antiprincipal imagem.

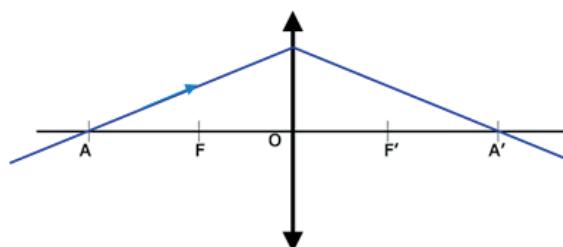


Figura 76 – Raio de luz que passando pelos pontos antiprincipal objeto e imagem

Para as lentes esféricas divergentes:

1^a – Um raio de luz paralelo e próximo ao eixo principal, após a refração, sempre irá divergir, mas o prolongamento passará pelo foco imagem.

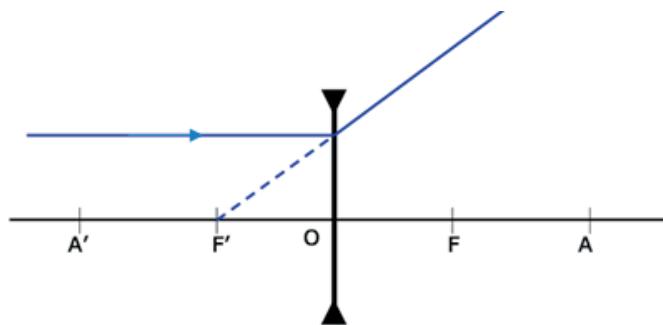


Figura 77 – Raio de luz paralelo ao eixo principal é refratado pela lente divergente.

2^a – Todo raio de luz incidente que passa pelo centro óptico da lente não sofre desvio.

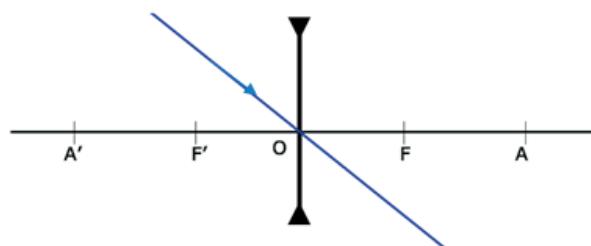


Figura 78 – Raio de luz paralelo ao eixo principal de uma lente divergente não é refratado

3^a – Em todo raio de luz incidente, cujo prolongamento passa pelo ponto antiprincipal imagem, após a refração, o prolongamento do raio refratado passará pelo ponto antiprincipal objeto.

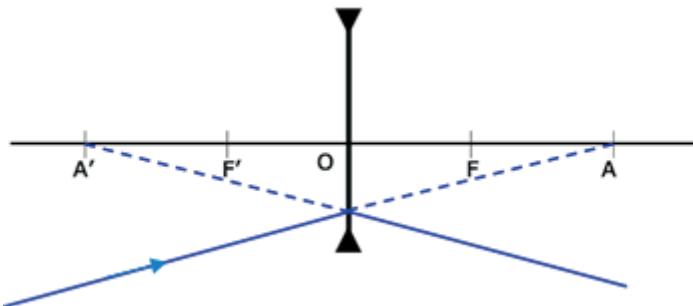


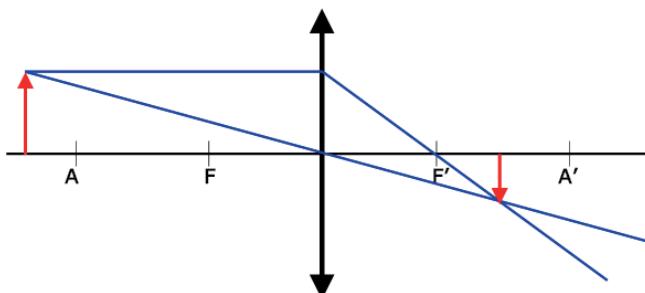
Figura 79 – Prolongamentos de raios de luz passando pelos pontos antiprincipal objeto e imagem de uma lente divergente

16.11 CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS FORMADAS POR LENTES ESFÉRICAS

As imagens formadas nas lentes esféricas podem ser reais ou virtuais, direitas ou invertidas e maiores ou menores que o objeto.

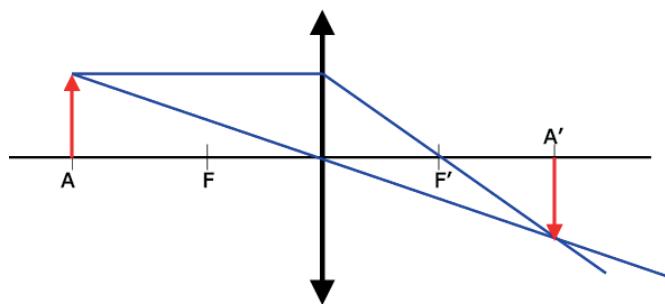
Nas lentes esféricas convergentes:

a) Quando o objeto é colocado à esquerda do ponto antiprincipal objeto:



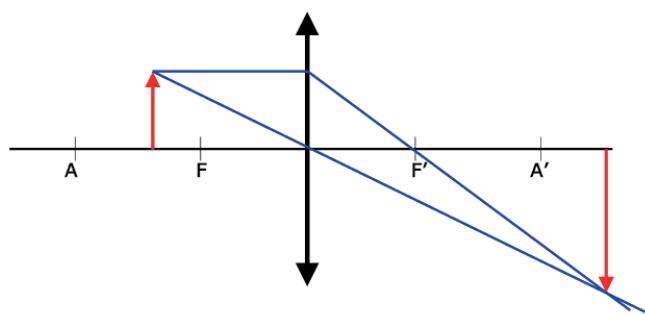
A imagem é real, invertida e menor que o objeto.

b) Quando o objeto é colocado sobre o ponto antiprincipal objeto:



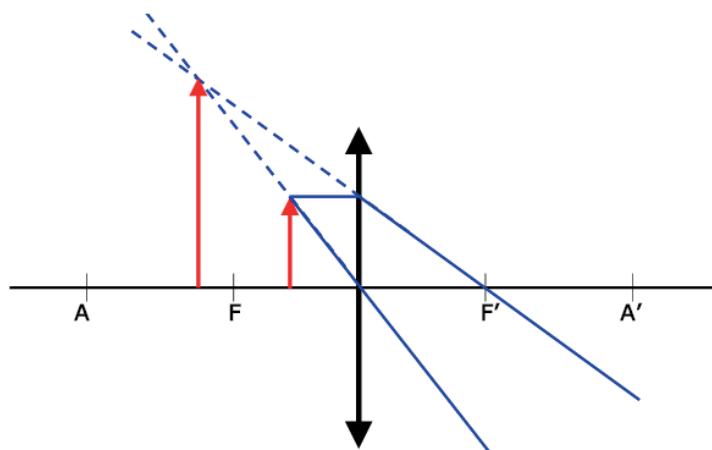
A imagem é real, invertida e do mesmo tamanho que o objeto.

c) Quando o objeto está entre o ponto antiprincipal objeto e o foco:



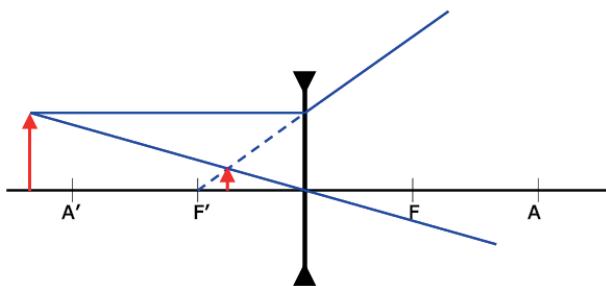
A imagem é real, invertida e maior que o objeto.

d) Quando o objeto está à direita do foco objeto:



A imagem é virtual, direita e maior que o objeto.

Nas lentes esféricas divergentes, qualquer que seja a posição do objeto, sua imagem será sempre virtual, direita e menor que o objeto.



16.12 AUMENTO LINEAR TRANSVERSAL

Definimos como aumento linear transversal a relação

$$A = -\frac{y'}{y}$$

ou

$$A = -\frac{p'}{p}$$

sendo que y é a altura do objeto de abscissa p , e y' a altura da imagem de abscissa p' . Lembre-se do referencial adotado: o eixo y tem sentido positivo para cima; objetos e imagens direitos são positivos e objetos e imagens invertidos são negativos.

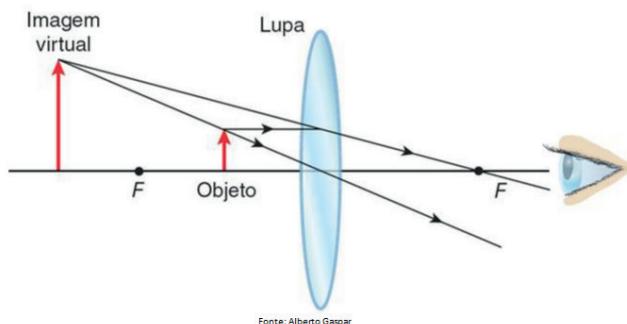
16.13 INSTRUMENTOS ÓPTICOS DE OBSERVAÇÃO

Os instrumentos de observação podem ser de dois tipos:

- De aproximação: são aqueles que permitem a visão de objetos que se encontram muito distantes do observador. Como exemplos desse tipo de instrumento de observação, podemos citar as lunetas e os telescópios;
- De aumento: são aqueles que permitem a visão de uma imagem ampliada de objetos pequenos. Como exemplos desse tipo de instrumento, podemos citar a lupa e o microscópio.

A) A LUPA E O MICROSCÓPIO

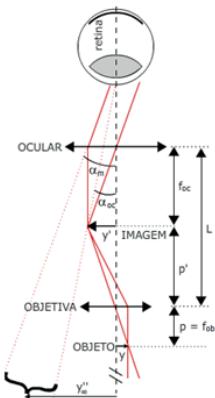
A lupa, também chamada de microscópio simples, é o mais básico de todos os instrumentos de observação. Ela consiste numa lente convergente de pequena distância focal. A imagem obtida é virtual, direita e maior que o objeto. O objeto deve ser colocado entre o foco e o centro óptico da lente, como está indicado na figura a seguir:



Fonte: Alberto Gaspar

Figura 80 – Esquema de uma Lupa

O microscópio composto consiste em duas lentes convergentes acopladas coaxialmente, dentro de um tubo fechado. A objetiva, que focaliza o objeto, deve ter uma distância focal (f_{objetiva}) menor que a distância focal da lente ocular (f_{ocular}), através da qual o observador vê a imagem final. Observe a figura a seguir e perceba que a imagem final é virtual, invertida e maior que o objeto.



Fonte: Alberto Gaspar

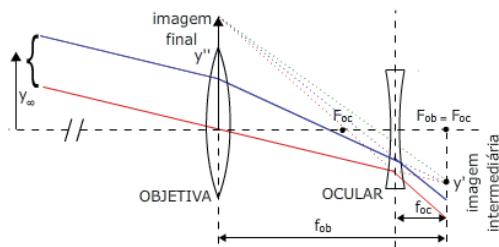
Figura 81 – Esquema de um microscópio

Na prática, f_{OCULAR} é cerca de 10% do valor da distância entre as lentes ocular e objetiva (L). Por conseguinte, podemos desprezar o seu valor e admitir que L é aproximadamente igual a p' . Dessa forma, costuma-se usar a seguinte equação para determinar o aumento do microscópio composto, sendo d a distância do objeto visto a olho nu:

$$A_{\text{microscópio}} = \frac{d \cdot L}{f_{\text{ocular}} \cdot f_{\text{objetiva}}}$$

b) LUNETA OU TELESCÓPIO DE GALILEU

Apesar de Galileu não ser o inventor do telescópio, foi o primeiro a utilizá-lo com fins científicos, apontando-o para o céu. Ouvindo falar da ideia de Hans Lippershey, Galileu construiu um telescópio com capacidade de ampliar a imagem 30 vezes. A luneta ou o telescópio de Galileu emprega duas lentes: uma divergente (objetiva), cuja distância focal é da ordem de metros, e outra divergente (ocular), cuja distância focal é da ordem de centímetros. Pela figura a seguir, observe que, no telescópio de Galileu, a imagem não é invertida.



Fonte: Alberto Gaspar

Figura 82 – Esquema de uma luneta

c) TELESCÓPIO REFRATOR

O telescópio refrator utiliza duas lentes convergentes: uma objetiva e outra ocular. Veja, na figura a seguir, que a imagem é virtual, invertida e maior que o objeto.

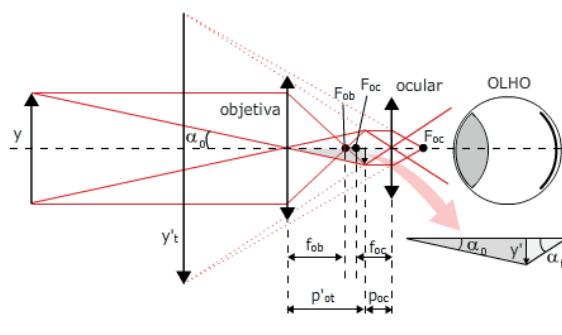


Figura 83 – Esquema de um telescópio refrator

Sendo f_{ocular} e f_{objetiva} as distâncias focais das lentes ocular e objetiva, respectivamente, a equação que possibilita a determinação do aumento proporcionado pelo telescópio é

$$A_{\text{telescópio}} = - \frac{f_{\text{ocular}}}{f_{\text{objetiva}}}$$

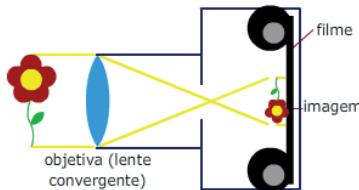
16.14 INSTRUMENTOS ÓPTICOS DE PROJEÇÃO

Os instrumentos de projeção, diferentes dos instrumentos de observação, apesar de também fornecerem imagens ampliadas dos objetos, têm como principal função tornar visível um objeto para um grande número de pessoas. Como exemplos de instrumentos de projeção, podem ser mencionados os projetores, de uma forma geral (retroprojetor, o projetor de *slides* e projetores de cinema), e a máquina fotográfica.

Assim, podemos definir os instrumentos de projeção como aqueles que fornecem uma imagem real, e esta pode, portanto, ser projetada sobre uma tela, um filme ou qualquer outro anteparo.

A) MÁQUINA FOTOGRÁFICA

A estrutura básica de uma máquina fotográfica simples se constitui de uma câmara escura, na qual, em uma das extremidades, há uma lente convergente (objetiva), a qual capta as luzes provenientes do objeto e, na extremidade oposta, há um filme, perpendicular ao eixo óptico da lente, no qual será projetada a imagem do objeto:



Fonte: <http://www.dhnet.org.br>

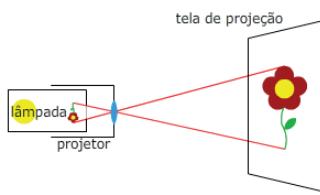
Figura 84 – Esquema de uma máquina fotográfica

Se a imagem do objeto, conjugada pela lente, não for projetada perfeitamente sobre o filme, a fotografia obtida não será nítida. Desse modo, para focalizar corretamente o objeto, de sorte que sua imagem seja projetada perfeitamente sobre o filme, as máquinas fotográficas são dotadas de dispositivos que permitem afastar ou aproximar a lente do filme.

b) PROJETORES DE *SLIDES*

Assim como a máquina fotográfica, os projetores de *slides* usam uma lente convergente para fornecer uma imagem real, a qual, portanto, pode ser projetada.

As máquinas fotográficas contam com luz ambiente que ilumina o objeto a ser fotografado, para sensibilizar o filme. No caso dos projetores de *slides*, a luz natural do ambiente não é suficiente, e o objeto, que deve ser colocado próximo ao foco da lente convergente (objetiva), precisa ser intensamente iluminado. Assim, a imagem desse objeto é projetada em uma tela:

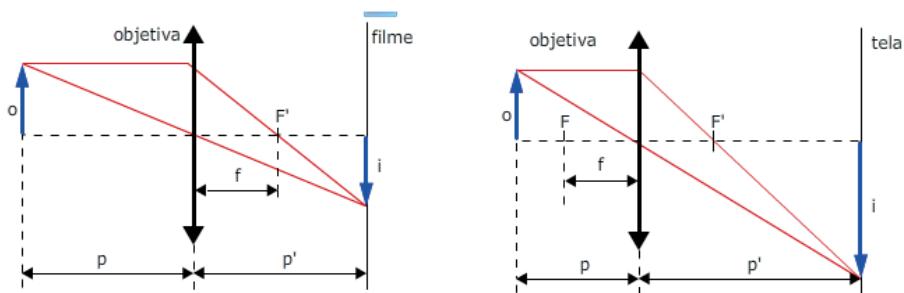


Fonte: <http://www.blogprojetovida.com.br>

Figura 85 – Esquema de um projetor de slides

Tanto nas máquinas fotográficas quanto nos projetores de *slides*, a focalização da imagem na tela ou no filme é importante para a qualidade da nitidez do que será projetado. Por isso, vamos estabelecer algumas equações importantes que

envolvem a construção das imagens conjugadas pela lente objetiva dos instrumentos de projeção. Considere os esquemas de uma máquina fotográfica e de um projetor, que pode ser de *slides* ou de cinema, entre outros:



admitindo que:

- p é distância do objeto à lente;
- p' é a distância da imagem à lente;
- o é a altura do objeto;
- i é a altura da imagem projetada;
- f é a distância focal da lente

Observadas as figuras anteriores, podemos escrever as seguintes equações, tendo em vista que A é o aumento da imagem

$$A = - \frac{p}{p'}$$

17 ELETROSTÁTICA

17.1 CARGA ELÉTRICA

Toda matéria é formada por átomos que, por sua vez, são compostos por partículas. De maneira geral, os átomos são compostos de, basicamente, três partículas: prótons, elétrons e nêutrons. Todas elas possuem massa, porém, apenas os prótons e os elétrons exibem uma propriedade diferente dos nêutrons: a carga elétrica. Assim, prótons e elétrons tendem a exercer, um sobre o outro, uma força de atração, enquanto, dois prótons e dois elétrons, cada par isoladamente, tendem a se repelir. Convencionou-se, assim, chamar a carga do elétron de negativa (-) e do próton de positiva (+).

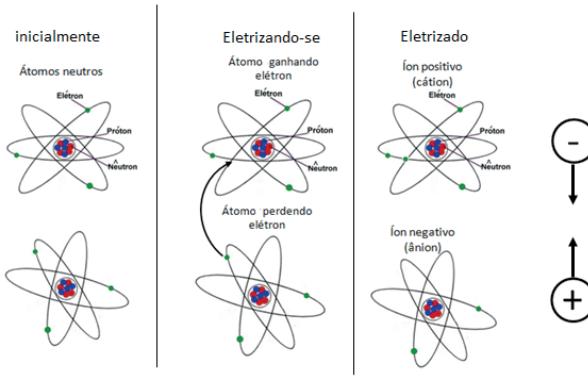
No SI (Sistema Internacional de Unidades), a unidade de carga elétrica é o Coulomb C.

A carga elétrica de um elétron (e) é igual a $-1,6 \times 10^{-19} C$, enquanto a carga do próton é igual a $+1,6 \times 10^{-19} C$.

Porém, uma questão é intrigante: se cargas elétricas exercem forças de atração umas sobre as outras, e se elas são inerentes a toda matéria, por que não observamos essa força elétrica sempre?

Porque os átomos, naturalmente, se apresentam neutros, ou seja, com o número de prótons igual ao número de elétrons. Assim, como o número de cargas positivas é igual ao de negativas, a carga elétrica total é nula e, dessa forma, não há forças de natureza elétrica.

Todavia, se um átomo ganhar ou perder elétrons, ou seja, se se eletrizar, passa a exibir o fenômeno de exercer força de natureza elétrica. Observe a figura 1, a seguir:



Fonte: Projeto Condigital

Figura 1 – Cargas elétricas de átomos e íons

Inicialmente, os átomos estão neutros; ao perder um elétron, um átomo se transforma num íon positivo, denominado cátion; e o outro átomo, o qual ganhou um elétron, se transforma num íon negativo, denominado ânion. A partir de então, é possível observar a ação de força elétrica entre eles.

Assim, concluímos que o número de elétrons, em excesso ou em falta, em um material define sua carga elétrica (Q).

Num corpo com excesso de cargas elétricas negativas (elétrons), sua carga elétrica (Q) será

$$Q = -n \cdot e$$

Do mesmo modo, se o corpo estiver com falta de elétrons, sua carga elétrica (Q) será

$$Q = +n \cdot e$$

onde:

n é o número de elétrons em excesso;

e é a carga elementar de cada elétron, ou seja, $e = 1,6 \times 10^{-19} C$

17.2 PRINCÍPIO DA ATRAÇÃO E REPULSÃO DE CARGAS ELÉTRICAS

O princípio da atração e da repulsão afirma que partículas com cargas elétricas do mesmo sinal se repelem, enquanto partículas com cargas elétricas de sinais opostos se atraem. Considere a figura 2, a seguir:

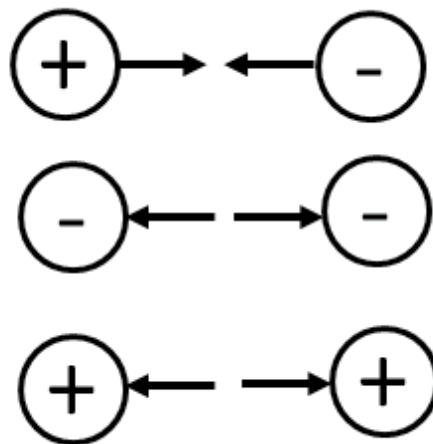


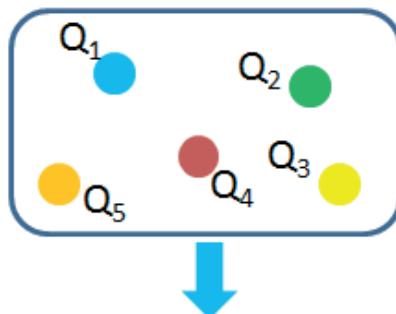
Figura 2 – Cargas elétricas se atraindo e se repelindo

1.17.3 PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS

Na natureza nada se perde, nada se cria, tudo se transforma. Isso é uma Lei Natural: a da Conservação. As cargas elétricas também se conservam, ou seja, as cargas elétricas, que um corpo perde, um outro ganha.

Dessa maneira, pode-se enunciar o seguinte princípio: “Num sistema eletricamente isolado (que não pode trocar cargas elétricas senão com os corpos que estão dentro desse sistema), a soma algébrica das quantidades de cargas elétricas permanece constante”.

SISTEMA ELÉTRICAMENTE ISOLADO



$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 0$$

Figura 3 - Princípio da Conservação de cargas elétricas

17.4 CONDUTORES E ISOLANTES ELÉTRICOS

Toda matéria é composta por átomos. Contudo, dependendo da maneira como esses átomos estão estruturados, no interior da matéria, os elétrons ou íons podem estar mais livres para se movimentar em seu interior. Assim, pode-se classificar os materiais em condutores ou isolantes (dielétricos).

Se, no interior do material, os elétrons se encontrarem mais livres para se movimentar, dizemos que são condutores. Caso contrário, se, em seu interior, os elétrons se encontrarem mais presos, com dificuldades para se movimentar, esses materiais serão chamados de isolantes (dielétricos).

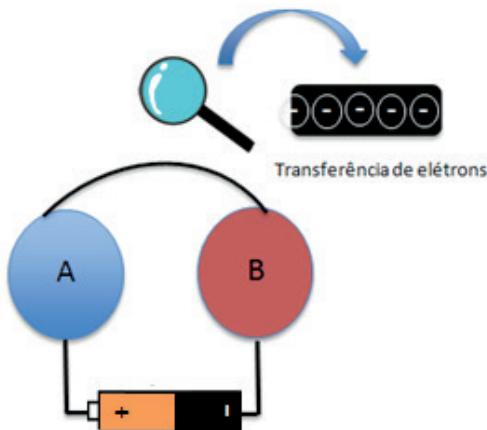


Figura 4 – Fio condutor elétrico permitindo o movimento dos elétrons entre os corpos A e B

Na figura 4, temos um exemplo de fios feitos de um material condutor, unindo os corpos A e B a uma pilha (gerador elétrico). Nos fios, os elétrons estão mais livres e, portanto, podem se mover com mais facilidade, favorecendo o movimento dos elétrons entre os corpos A e B. Porém, se o fio fosse constituído de um material isolante, os elétrons teriam mais dificuldade de circular.

É importante destacar que a propriedade de ser um isolante (dielétrico) não é absoluta. Dependendo das condições, um material isolante pode se transformar em condutor. Quando isso acontece, diz-se que se rompeu a rigidez dielétrica do material.

O ar, por exemplo, em condições normais, é um isolante (um dielétrico). Todavia, se a energia elétrica, numa determinada região, for suficientemente alta, tendo em vista a eletrização das nuvens, os portadores de carga vão conseguir se movimentar pelo ar, porque se rompeu sua rigidez dielétrica.

Podemos observar esse fenômeno em tempestades: a energia elétrica envolvida é tão alta que a rigidez dielétrica do ar é rompida e ele passa a ser condutor. Dessa forma, observamos o movimento das cargas elétricas na forma de raios.



Fonte: <http://www.cosmoconsultoria.com.br/>

Figura 5 – Raios devido ao rompimento da rigidez dielétrica do ar

17.5 PROCESSOS DE ELETRIZAÇÃO

A eletrização é o fenômeno através do qual um corpo neutro se torna eletrizado devido à perda ou ganho de elétrons.

Nos condutores eletrizados, as cargas elétricas se deslocam na superfície do corpo, pois, nesses materiais, as cargas elétricas apresentam grande mobilidade e, devido às forças de repulsão, elas tendem a afastar-se ao máximo, uma das outras, de sorte que, no interior dos condutores eletrizados, a carga elétrica é nula ($Q_{int.} = 0$). Por isso, muitas vezes, as cargas acabam escoando para o ambiente, sendo difícil retê-las no corpo condutor. Nos corpos isolantes, não ocorre este fato e, por isso, é mais fácil mantê-los eletrizados.

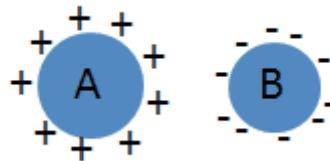


Figura 6 – A carga elétrica no interior de condutores eletrizados é nula

Existem três formas básicas de eletrizar um corpo: por atrito, por contato ou por indução.

17.5.1 ELETRIZAÇÃO POR ATRITO

Um dos processos pelos quais podemos eletrizar um corpo é o atrito. Quando se atritam dois corpos, inicialmente neutros, ocorre uma troca de elétrons livres entre eles, de modo que um dos corpos fica eletrizado positivamente (perde elétrons) e o outro fica eletrizado negativamente (ganhá elétrons).

Ao final do processo de eletrização por atrito, eles adquirem cargas elétricas de mesmo módulo e de sinais opostos. A eletrização por atrito só acontece se os corpos atritados forem de materiais diferentes (observe a série triboelétrica).

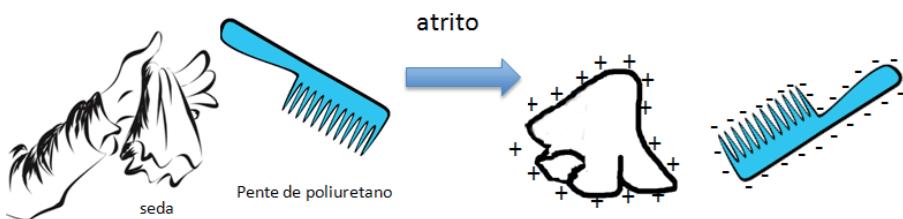


Figura 7 – Eletrização por atrito

Quando se atritam dois corpos quaisquer, por exemplo, um pente de plástico e um pano de seda, um deles ficará eletrizado positivamente, pois perderá elétrons, enquanto o outro ficará eletrizado negativamente, porque ganhará esses elétrons perdidos.

Na figura abaixo, apresentamos uma série Triboelétrica. Ela se constitui de uma lista de materiais dispostos verticalmente, indicando que, quando atritarmos um material de cima com outro de baixo, o de cima tende a eletrizar-se positivamente e o de baixo, a eletrizar-se negativamente.

Considerando que o pente é feito de poliuretano, ao consultarmos a série triboelétrica a seguir, sabemos que, depois de atritado com a seda, o pente ficou eletrizado negativamente, enquanto o pano ficou eletrizado positivamente.

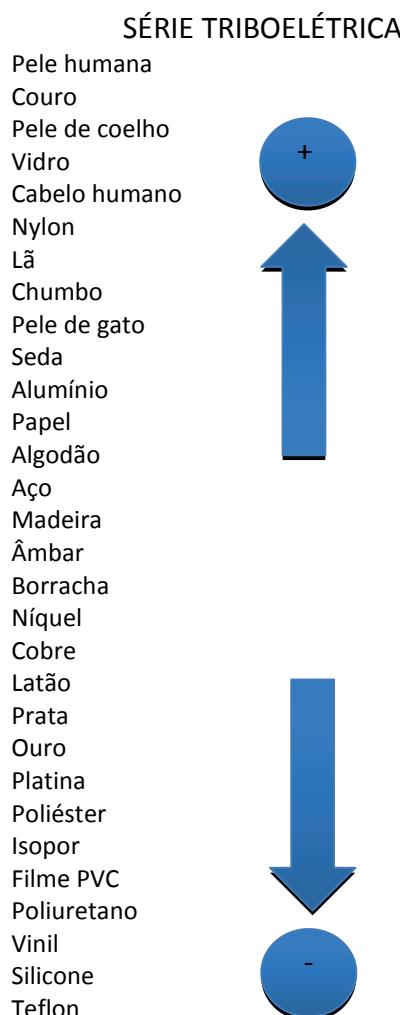


Figura 8 – Série triboelétrica

Na eletrização por atrito, os corpos ficam eletrizados com cargas elétricas diferentes.

17.5.2 ELETRIZAÇÃO POR CONTATO

Quando um corpo eletrizado é colocado em contato com outro, inicialmente neutro, um fluxo de elétrons (movimento temporário de elétrons livres) se estabelece de um corpo para o outro, até que ambos atinjam o equilíbrio elétrico. Assim, produz-se uma redistribuição de cargas entre os corpos e os dois ficam eletrizados com cargas de mesmo sinal.

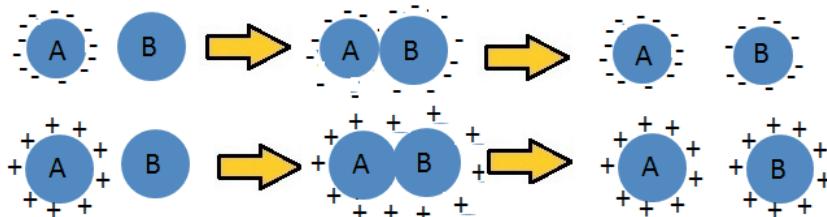


Figura 9 - Eletrização por contato

Considere dois corpos A e B idênticos. Se A estiver eletrizado negativamente e for colocado em contato com B, inicialmente neutro, ocorre a transferência de cargas elétricas negativas em excesso de A para B, de modo que ambos os corpos, A e B, ficarão eletrizados negativamente.

Se A estiver carregado positivamente e for colocado em contato com B, inicialmente neutro, o corpo A atrai as cargas negativas de B, deixando-o positivo. Dessa maneira, ambos os corpos, A e B, ficarão eletrizados positivamente.

Note que, diferentemente da eletrização por atrito, na eletrização por contato, os corpos ficam carregados com cargas iguais.

17.5.3 ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO

Considere que um corpo A eletrizado negativamente se aproxima de outro corpo (neutro). As cargas elétricas negativas de A atraem as cargas positivas e repelem as cargas negativas de B, de tal forma que as cargas positivas e negativas se separam em lados opostos do corpo. Esse fenômeno é conhecido como indução elétrica. Para deixar o corpo B eletrizado, liga-se um fio terra na parte oposta ao corpo eletrizado A. Nesse caso, os elétrons de B são atraídos pelas cargas positivas do solo, deixando-o eletrizado positivamente. Depois, basta desligar o fio terra.

Veja que, assim como eletrização por atrito, os corpos ficam eletrizados com cargas de sinal contrário.

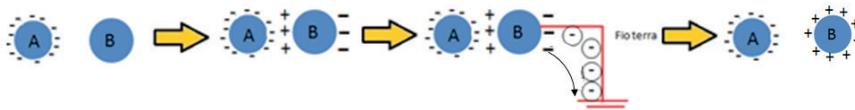


Figura 10 - Eletrização por indução

17.6 LEI DE COULOMB

Já aprendemos que cargas de sinais diferentes se atraem e de sinais iguais se repelem. Porém, qual é a intensidade da força de atração ou de repulsão?

Charles Augustin Coulomb, a partir de dados experimentais, concluiu que a intensidade da força elétrica exercida sobre duas cargas elétricas puntiformes (cuja dimensão pode ser considerada desprezível, quando comparada com as distâncias entre elas) é diretamente proporcional ao seu produto e inversamente proporcional ao quadrado da distância a que estão uma da outra.

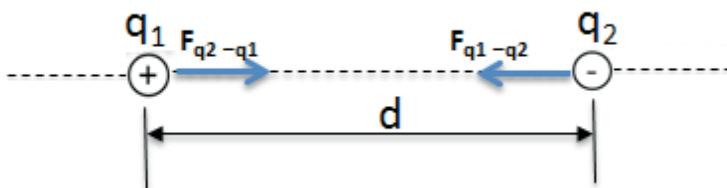


Figura 11 – Ação de forças sobre cargas elétricas

Matematicamente, podemos escrever:

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

onde

K é uma constante relacionada com o meio em que as cargas estão. No vácuo $K = 9,0 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

No Sistema Internacional de Unidades, a força \vec{F} é dada em N (newtons); as cargas (q_1 e q_2) são dadas em C (coulombs) e a distância (d) é dada em m (metros).

Observe que, à medida que uma carga se distancia de outra, a intensidade da força elétrica diminui consideravelmente. Pelo gráfico a seguir, pode-se notar que, para o dobro da distância entre as cargas elétricas, a força elétrica cai pela metade.

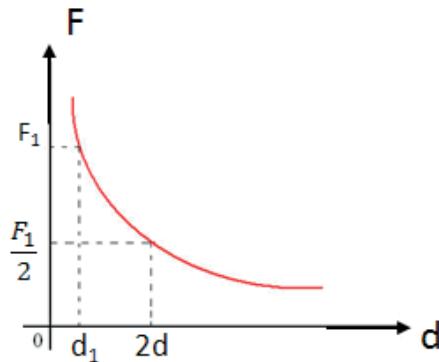


Figura 12 – Gráfico da intensidade da força elétrica em relação à distância entre cargas elétricas

17.6.1 FORÇA ELÉTRICA RESULTANTE

Quando duas ou mais cargas elétricas interagem entre si, geram uma força resultante. Como a força é uma grandeza vetorial, a determinação da resultante deve seguir as regras que aprendemos quando estudamos vetores.

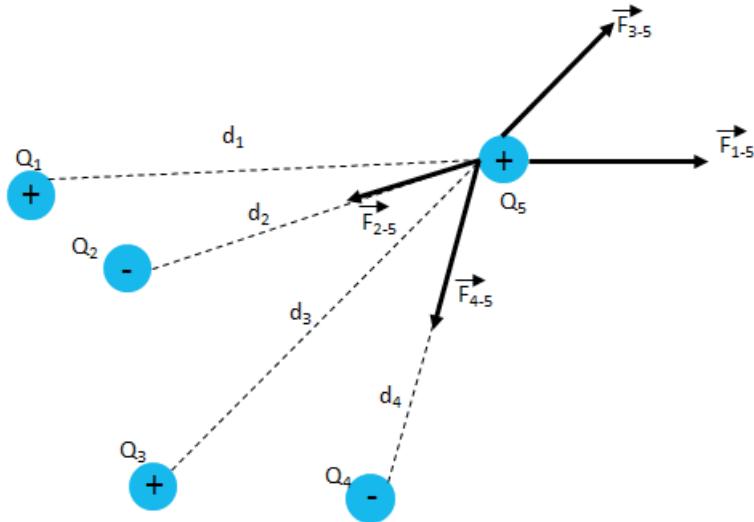


Figura 13 - Ação de forças entre cargas elétricas

Portanto:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{1-5} + \vec{F}_{2-5} + \vec{F}_{3-5} + \vec{F}_{4-5}$$

17.7 CAMPO ELÉTRICO

A força elétrica age à distância, por meio do campo elétrico, o qual serve como um transmissor das interações entre cargas elétricas.

Faraday propôs essa ideia para explicar como uma força poderia agir sem contato. Para o cientista, o campo elétrico constitui-se numa alteração do espaço, devido à presença de uma carga elétrica Q denominada carga-fonte. Pode-se associar a essa alteração no espaço uma grandeza vetorial identificada como vetor campo elétrico (\vec{E}).

A alteração no espaço gerada pela carga-fonte costuma ser representada por linhas de força, em relação à qual o vetor campo elétrico é sempre tangente. Por convenção, os campos elétricos gerados por cargas fontes positivas são orientados por linhas de força divergentes, ou seja, que apontam para fora da carga, enquanto os campos elétricos gerados por cargas elétricas fontes negativas são representados por linhas de força convergentes, isto é, que apontam para a carga.

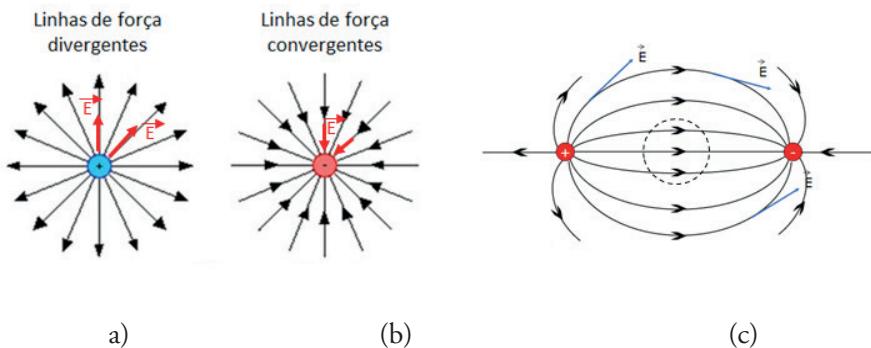


Figura 14 – O vetor campo elétrico (\vec{E}) é sempre tangente às linhas de força.

Note que, na região tracejada, há mais linhas de força do que em outras: isso indica que o campo elétrico é mais intenso.

Pode-se calcular a intensidade do vetor campo elétrico (\vec{E}) num determinado ponto do espaço de duas formas:

A primeira é conhecendo o valor da carga-fonte (Q) e a distância (d) a que ela está do ponto considerado. Nesse caso, utilizamos a seguinte expressão:

$$E = K \frac{Q}{d^2}$$

onde k é a constante que depende do meio onde a carga elétrica está. No vácuo, vale

$$K = 9,0 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

A unidade de campo elétrico no Sistema Internacional (SI) é o newton por Coulomb ($\frac{N}{C}$)

Note que, assim como a intensidade da força elétrica, a intensidade do campo elétrico diminui significativamente, à medida que se afasta da carga elétrica fonte.

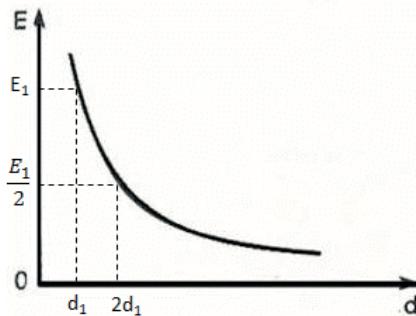


Figura 15 – Gráfico da intensidade do campo elétrico pela distância da carga-fonte em relação ao ponto do espaço considerado

a) A segunda é percebendo sua influência numa carga de prova (q) colocada no ponto considerado.

Se houver um campo elétrico atuando nesse ponto, uma força elétrica agirá sobre a carga de prova q . Assim, podemos ter duas possibilidades de representação da situação proposta, dependendo do sinal da carga de prova:

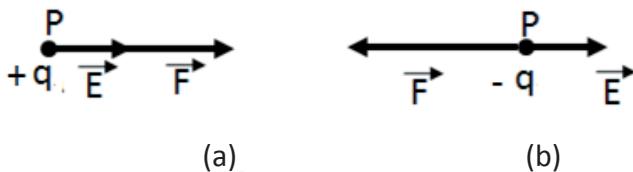


Figura 16 – Ação da força \vec{F} , gerada pelo campo elétrico, sobre uma carga de prova q : em (a), a carga de prova é positiva; em (b), a carga de prova é negativa

Pela convenção estabelecida, se a carga de prova q for positiva, o campo elétrico e a força terão o mesmo sentido. Porém, se a carga de prova q for negativa, a força e o campo elétrico terão sentidos contrários.

O campo elétrico no ponto P pode ser determinado pela expressão

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

17.7.1 CAMPO ELÉTRICO GERADO POR DIFERENTES CARGAS ELÉTRICAS

Considere diferentes cargas elétricas Q_1 , Q_2 , Q_3 , puntiformes, distantes d_1 , d_2 e d_3 , respectivamente de um ponto P localizado no espaço. Para determinarmos o campo elétrico resultante, é preciso realizar uma soma vetorial.

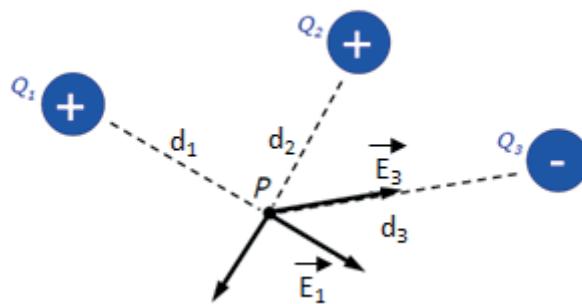


Figura 17 – Campos elétricos sendo gerados por diferentes cargas elétricas fonte em um ponto P do espaço

$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

17.8 DIFERENÇA DE POTENCIAL ELÉTRICO

Considere uma carga elétrica de prova puntiforme q colocada numa região do espaço, no qual está estabelecido um campo elétrico \vec{E} uniforme (ou seja, em que o módulo, a direção e o sentido não se alteram). Sabemos que uma força elétrica \vec{F} vai agir sobre essa carga elétrica de prova, deslocando-a de certa distância d . Dessa forma, há realização de trabalho.

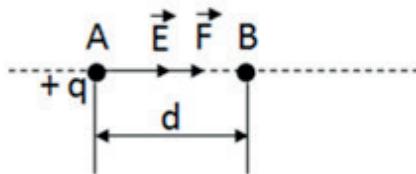


Figura 18 – Ação de uma força elétrica sobre uma carga de prova q devido a um campo elétrico estabelecido

$$\tau = F \cdot d$$

Como

$$F = q E$$

Então:

$$\tau_{A-B} = qE \cdot d$$

Como trabalho é a variação de energia potencial, podemos definir a diferença de potencial elétrico (ddp) representada por ΔV como sendo

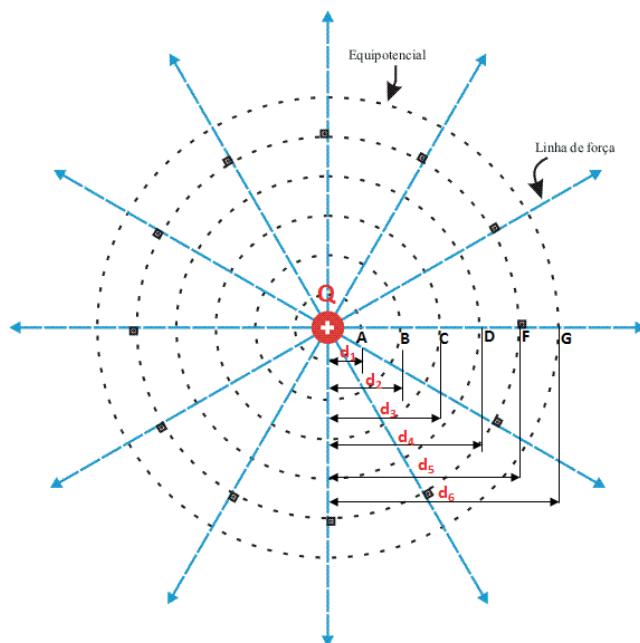
$$\Delta V = \frac{\Delta E_p}{q}$$

$$V_B - V_A = \frac{E_{pB} - E_{pA}}{q}$$

A unidade de diferença de potencial elétrico no Sistema Internacional SI é J/C , ou joule por coulomb (J/C), ou volt (V).

Quando dizemos que a tomada de uma residência é de 127 V, isso quer dizer que, se um aparelho elétrico for ligado a ela, cada carga elétrica de 1 C que se deslocar da tomada até o aparelho receberá uma energia de 127 J.

Tendo em vista uma carga-fonte positiva (Q) puntiforme, podemos definir o potencial elétrico gerado em diferentes pontos do espaço.



Fonte: <http://www.sofisica.com.br/>

Figura 19 – Superfícies equipotenciais geradas por uma carga-fonte positiva Q

$$V_A = K \frac{Q}{d_1}$$

$$V_B = K \frac{Q}{d_2}$$

$$V_C = K \frac{Q}{d_3}$$

E assim sucessivamente.

Note que, para pontos equidistantes da carga-fonte Q, o potencial é o mesmo, por isso, as circunferências tracejadas em torno da carga-fonte são chamadas de superfícies equipotenciais.

17.8.1 POTENCIAL ELÉTRICO GERADO POR DIFERENTES CARGAS ELÉTRICAS

Considere diferentes cargas elétricas puntiformes Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4 , distantes d_1 , d_2 , d_3 e d_4 , respectivamente, de um P no espaço. Cada uma delas vai gerar um potencial elétrico nesse ponto P. Como o potencial elétrico não é uma grandeza

vetorial, a determinação do potencial em P é a soma algébrica dos potenciais gerados pelas cargas.

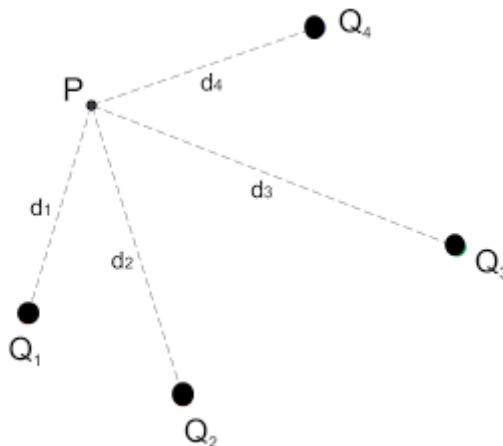


Figura 20 – Potencial elétrico gerado por diferentes cargas Q num ponto P do espaço

$$V_p = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$V_p = K \frac{Q_1}{d_1} + K \frac{Q_2}{d_2} + K \frac{Q_3}{d_3} + K \frac{Q_4}{d_4}$$

$$V_p = K \left(\frac{Q_1}{d_1} + \frac{Q_2}{d_2} + \frac{Q_3}{d_3} + \frac{Q_4}{d_4} \right)$$

18 ELETRODINÂMICA

18.1 CORRENTE ELÉTRICA

Em eletrostática, aprendemos que condutor elétrico pode ser definido como materiais nos quais os elétrons se movimentam mais facilmente. Dessa forma, se no interior de um fio, constituído de um material condutor, for estabelecido um campo elétrico, tendo em vista a aplicação de uma ddp (diferença de potencial) em suas extremidades, uma força elétrica atuará sobre os elétrons livres do condutor e estes se moverão em seu interior.

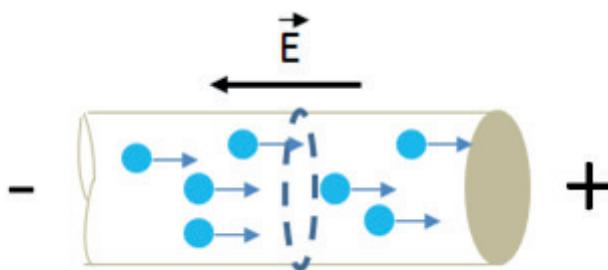


Figura 1 – Corrente elétrica sendo estabelecida dentro de um condutor

É nesse contexto que surge a corrente elétrica, quer dizer, um movimento ordenado de elétrons no interior de um condutor.

Note que, como os elétrons têm carga elétrica negativa, eles se movem no sentido contrário ao do vetor campo elétrico (\vec{E}). Esse é o sentido real da corrente elétrica, dentro de um condutor.

Todavia, por questão de comodidade dos estudos, os físicos decidiram definir o sentido da corrente elétrica como se fosse igual ao do vetor campo elétrico; assim, a partir de agora, adotaremos o sentido convencional para corrente elétrica.

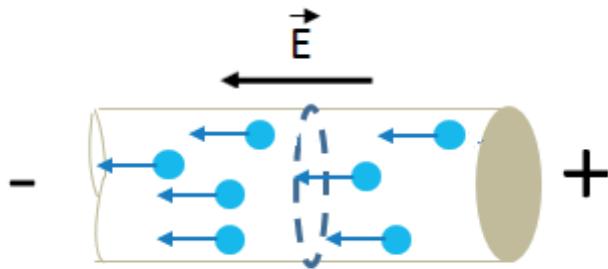


Figura 2 – Sentido convencional da corrente elétrica

Para definir a intensidade de corrente elétrica (i) que atua num circuito elétrico, considere certo número (n) de elétrons, cada um deles com uma carga (e = $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), que passa numa secção transversal do condutor (circunferência tracejada) por unidade de tempo (Δt). A carga elétrica total (Q) que passa na secção transversal do condutor no tempo (Δt) é:

$$Q = ne$$

Nesse sentido, calcula-se a intensidade de corrente elétrica (i) pela expressão

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

No Sistema Internacional de Unidades (SI), como $[Q]$ é o coulombs (C) e Δt é dado em segundos (s), a unidade de corrente elétrica $[i]$ é o $\frac{C}{s}$ ou A (ampère).

Portanto, quando dizemos que, por um fio, passa uma corrente de 1 A, estamos afirmando que, numa secção transversal desse fio, a cada segundo, passa uma carga elétrica de 1 C.

Como 1A é uma corrente consideravelmente alta, é comum o emprego dos prefixos mili (m) e micro (μ) para a unidade de corrente. Assim, temos:

$$1\text{ miliampère} = 1\text{ mA} = 1 \times 10^{-3} \text{ A.}$$

$$1\text{ microampère} = 1\mu\text{A} = 1 \times 10^{-6} \text{ A.}$$

A corrente elétrica pode ser contínua ou alternada.

A corrente alternada, estabelecida nas tomadas residenciais, é caracterizada quando o sentido do campo elétrico não é único, ou seja, se altera periodicamente.

A corrente contínua, estabelecida pelos terminais das baterias de um carro e pelas pilhas que usamos nos aparelhos domésticos, é caracterizada pelo fato de o sentido do vetor campo elétrico ser único o tempo todo, ou seja, não varia.

18.1.1 EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA

- Efeito Joule: o movimento dos elétrons livres no interior do condutor muitas vezes provoca choques entre eles, gerando, como consequência, uma maior agitação atômica. Desse modo, parte da energia cinética dos elétrons é transformada em energia térmica (calor). Quanto maior for a resistência do condutor, maior será o efeito Joule. As lâmpadas incandescentes funcionam a partir desse efeito: as ondas de calor emitidas pelo filamento das lâmpadas atingem a frequência na faixa da visível.
- Efeito magnético: vimos que o estabelecimento de um campo elétrico produz a corrente elétrica. Veremos, mais adiante, que a passagem de corrente elétrica produz alterações no espaço ao redor do condutor, gerando o que chamamos campo magnético.
- Efeito fisiológico: é o efeito produzido quando a corrente elétrica percorre o corpo humano. O choque elétrico, que gera uma forte sensação de formigamento, pode, dependendo da intensidade da corrente elétrica, gerar fortes contrações musculares (destaque para o músculo cardíaco) e sérias queimaduras na pele.

18.2 LEIS DE OHM

O cientista Georg Simon Ohm, através de seus estudos, propôs duas leis importantes para o estudo da eletricidade.

18.2.1 PRIMEIRA LEI DE OHM

Em suas pesquisas, Ohm percebeu que materiais condutores ofereciam, naturalmente, uma resistência à passagem de corrente elétrica. A partir da experimentação, Ohm verificou que, mantendo-se a temperatura constante, o quociente entre a tensão aplicada nos terminais do condutor e a corrente que o percorre é uma constante característica desse condutor.

Para compreender melhor a primeira Lei de Ohm, considere três condutores diferentes, 1, 2 e 3, os quais são submetidos à mesma ddp (diferença de potencial). Percebemos que, mantendo-se a temperatura constante, a corrente elétrica que cada resistor permite passar é diferente. Observe o gráfico a seguir:

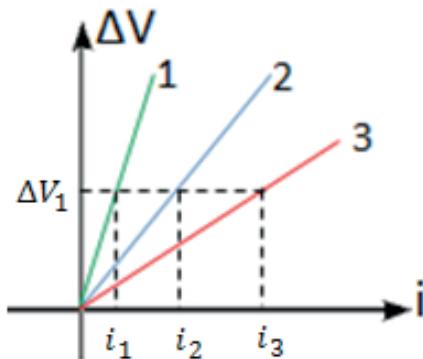


Figura 3 – Gráfico da diferença de potencial pela corrente elétrica

Note que, para a mesma diferença de potencial ΔV aplicada, o condutor 1 deixa passar i_1 , o condutor 2 deixa passar i_2 e o condutor 3 deixa passar i_3 .

A observação das diferentes inclinações da reta do gráfico autoriza-nos a concluir que, para cada condutor, temos uma resistência elétrica (R) diferente. Assim, podemos escrever:

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

A unidade de resistência elétrica **[R]**, no Sistema Internacional de Unidades (SI), é dada por $\frac{\text{volts}}{\text{ampère}} = \frac{V}{A}$; em homenagem a Ohm, essa unidade ficou conhecida como ohm, ou **Ω** .

É importante perceber que, para um mesmo condutor, R não muda, é sempre o mesmo, pois aumentando-se a ddp (**ΔV**), a corrente elétrica i aumenta na mesma proporção.

18.2.2 SEGUNDA LEI DE OHM

Ohm estudou os aspectos dos condutores que interferem nos valores da resistência que apresentam. Através de suas investigações, descobriu que um condutor de comprimento L e área A possui resistência R igual a:

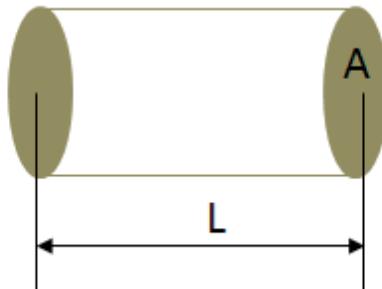


Figura 4 – Condutor elétrico de comprimento L e área da secção transversal igual a A

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

onde:

ρ é a resistividade do condutor, ou seja, uma característica específica de cada substância de que é constituído o condutor.

Graças ao trabalho de Ohm, foi possível a construção de resistores elétricos, ou seja, componentes que compõem os circuitos elétricos.



Fonte: <http://www.mundoeducacao.com>

Figura 5 – Resistor elétrico

18.3 CIRCUITOS ELÉTRICOS

Um circuito elétrico é um sistema fechado, constituído por uma associação de diferentes componentes elétricos, no qual é possível a circulação da corrente elétrica. Comumente, um circuito elétrico é composto dos seguintes componentes:

a) Gerador elétrico: responsável por fornecer a energia elétrica aos demais elementos do circuito. Pode ser uma pilha, uma bateria etc. Sua representação no circuito é feita das seguintes formas:

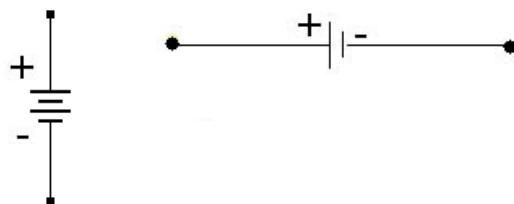


Figura 6 – Tipos de representação de um gerador elétrico

b) Resistor elétrico: componente elétrico capaz dissipar energia elétrica, transformando-a em calor (efeito Joule) e/ou controlar a corrente elétrica no circuito. Sua representação no circuito é feita das seguintes formas:

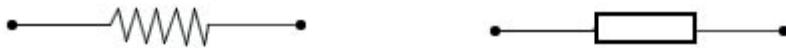


Figura 7 – Tipos de representação de um resistor elétrico

c) Chave ou interruptores: responsável por ligar e desligar o circuito elétrico, interrompendo ou permitindo a passagem de corrente elétrica. Sua representação no circuito é feita da seguinte forma:



Figura 8 – Representação de uma chave ou interruptor elétrico

d) Lâmpadas incandescentes: são dispositivos elétricos responsáveis por transformar energia elétrica em calor e energia luminosa. Seu efeito no circuito é igual ao de um resistor elétrico. Sua representação no circuito é feita da seguinte forma:



Figura 9 – Representação de uma lâmpada incandescente

e) Condutor elétrico: são os fios, ou seja, o elemento do circuito elétrico que liga todos os demais componentes e possibilita a circulação da corrente elétrica. Sua representação no circuito é feita da seguinte forma:



Figura 10 – Representação de um condutor elétrico

f) Amperímetro: é o medidor elétrico de intensidade de corrente elétrica. É sempre ligado em série com a região do circuito cuja intensidade da corrente elétrica se quer determinar:



Figura 11 – Representação de um amperímetro

g) Voltímetro: mede a diferença de potencial (ddp), entre dois pontos do circuito elétrico. O voltímetro deve ser sempre colocado em paralelo ao ramo do circuito onde se deseja medir a ddp.

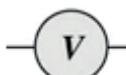


Figura 12 – Representação de um voltímetro

Portanto, podemos representar um circuito elétrico simples da seguinte forma:

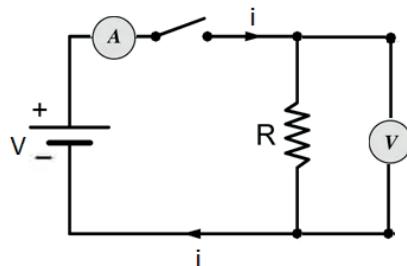


Figura 13 – Representação de um circuito elétrico simples

18.3.1 TIPOS DE CIRCUITOS

a) Circuitos elétricos em série: são circuitos elétricos nos quais existem dois ou mais resistores elétricos que estão associados em série, ou seja, quando o terminal de saída de um estiver ligado ao terminal de entrada do outro.

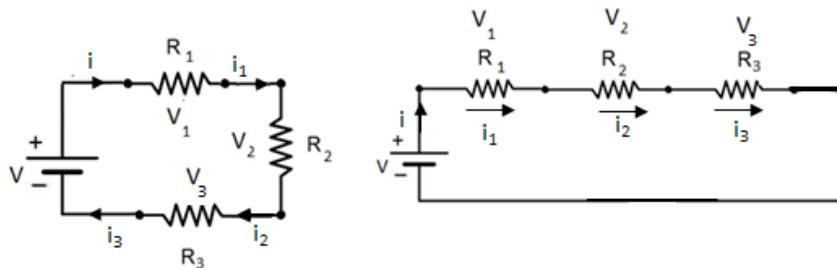


Figura 14 – Representação de circuitos elétricos em série

A associação de resistores em série apresenta as seguintes características elétricas:

- Todos os resistores são percorridos pela mesma corrente elétrica. Isso acontece porque o terminal de saída de cada resistor está ligado a um único terminal e, por conseguinte, existe um único caminho para os elétrons circularem.
- $i = i_1 = i_2 = i_3$
- A tensão elétrica entre os extremos da associação é a soma das tensões em cada resistor, pois, em cada resistor, há transformação de energia elétrica em energia térmica.

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

b) Circuitos elétricos em paralelo: são circuitos elétricos nos quais existem dois ou mais resistores elétricos que estão associados em paralelo, isto é, quando todos os terminais de entrada estão conectados ao mesmo ponto A e todos os terminais de saída estão conectados a um outro ponto B.

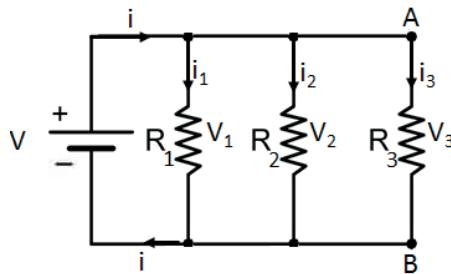


Figura 15 – Representação de um circuito elétrico em paralelo

A associação de resistores em paralelo apresenta as seguintes características elétricas:

- A corrente elétrica que atravessa a associação é a soma da corrente elétrica que percorre cada resistor, individualmente. Isso acontece porque cada resistor é um caminho para os elétrons circularem dentro da associação.

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

- A tensão elétrica entre os extremos da associação é igual à tensão elétrica que atua em cada resistor, individualmente, visto que todos os resistores estão conectados eletricamente aos mesmos pontos extremos A e B.
- $V = V_1 = V_2 = V_3$

c) Circuitos elétricos mistos

São circuitos elétricos que possuem resistores elétricos associados em paralelo e em série.

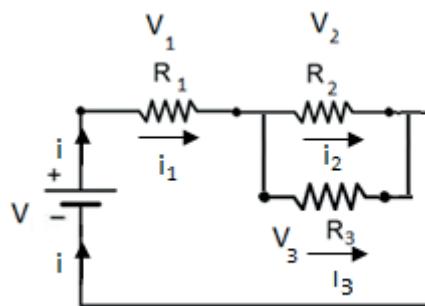


Figura 16 – Representação de um circuito elétrico misto

18.3.2 RESISTÊNCIA EQUIVALENTE

Se, buscando simplificar o circuito elétrico, decidíssemos trocar todos os resistores por apenas um único resistor, sem com isso mudar qualquer característica elétrica, precisaríamos determinar qual o valor de sua resistência. Esse novo resistor, o qual substitui todos os outros, deve possuir uma resistência denominada equivalente (R_E).

a) Determinação da resistência equivalente de um circuito em série

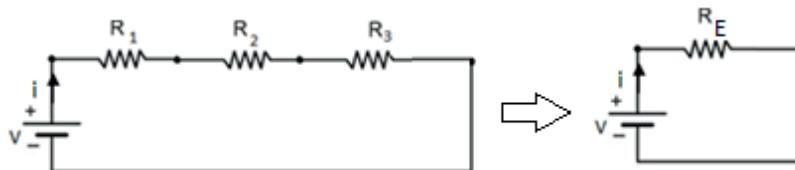


Figura 17 – Substituição dos três resistores elétricos em série por um resistor equivalente (R_E)

$$R_E = R_1 + R_2 + R_3$$

Analogamente, se tivermos uma associação em série com vários resistores de valores $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, o resistor equivalente R_E será igual a

$$R_E = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

b) Determinação da resistência equivalente de um circuito em paralelo

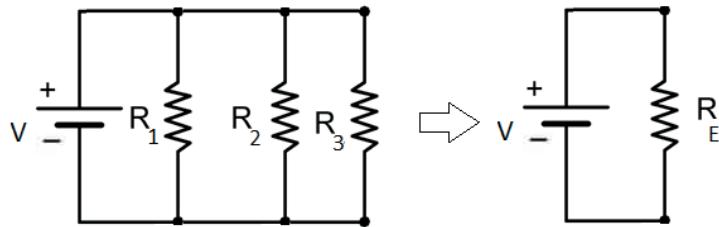


Figura 18 – Substituição dos três resistores elétricos em paralelo por um resistor equivalente (R_E)

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Analogamente, se tivermos uma associação em paralelo com vários resistores de valores $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, o resistor equivalente R_E será igual a

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

c) Determinação da resistência equivalente de um circuito misto

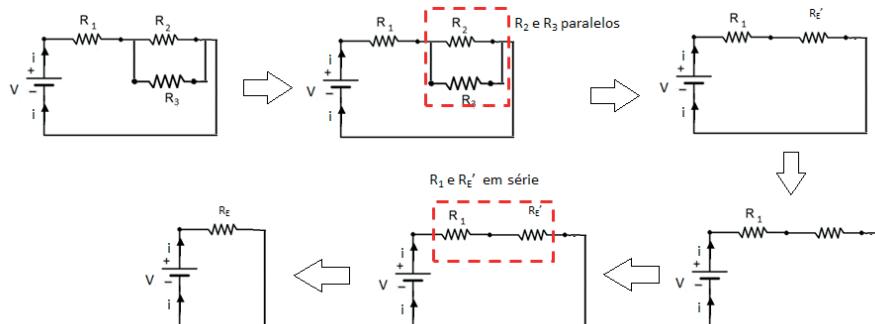


Figura 19 – Substituição dos três resistores elétricos ligados de forma mista por um resistor equivalente (R_E)

$$\frac{1}{R'_E} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 R_3} \rightarrow R'_E = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_E = R_1 + R'_E$$

$$R_E = R_1 + \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right)$$

18.4 POTÊNCIA ELÉTRICA DISSIPADA

Um dos grandes desafios da atualidade é o uso racional de energia elétrica. O mesmo desenvolvimento científico, que nos traz o conforto da iluminação noturna, do uso da TV, do computador, da máquina de lavar, dos aparelhos de ar condicionado etc., tem aumentado a demanda da sociedade por mais energia. Isso causa impactos ambientais significativos, de forma que, além de se evitar desperdícios, há a preocupação em se desenvolver aparelhos elétricos eficientes, capazes de realizar menos trabalho e gastem menos energia.

Quando um sistema consome (ou fornece) uma energia E , num intervalo de tempo Δt , a potência média (Pot) consumida (ou fornecida) nesse intervalo de tempo é definida por

$$Pot = \frac{E}{\Delta t}$$

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de energia é o *joule* (J), a unidade de tempo é o segundo (s) e a unidade de potência é o *watt* (W).

$$1 \text{ watt} = 1 \frac{\text{joule}}{\text{Segundo}} = \frac{J}{s} = 1W$$

Cada aparelho elétrico é projetado para funcionar com uma determinada potência, ou seja, consumir determinada energia, num certo intervalo de tempo.

Um aparelho que, para funcionar, consome muita energia elétrica num pequeno intervalo de tempo, vai gerar um custo na conta de energia elétrica muito elevado. Por isso, ou deve ser trocado, ou deve ser utilizado com parcimônia.

Note que, como o produto da potência pelo intervalo de tempo é igual a energia, quanto mais tempo um aparelho, com determinada potência, for usado, mais será a quantidade de energia gasta.

$$E = Pot \cdot \Delta t$$

Numa conta de energia elétrica, popularmente chamada de conta de luz, há um histórico do consumo de energia.

Note que a unidade é o kWh (quilowatt hora), isto é, o valor multiplicado por 1000 multiplicado por hora.

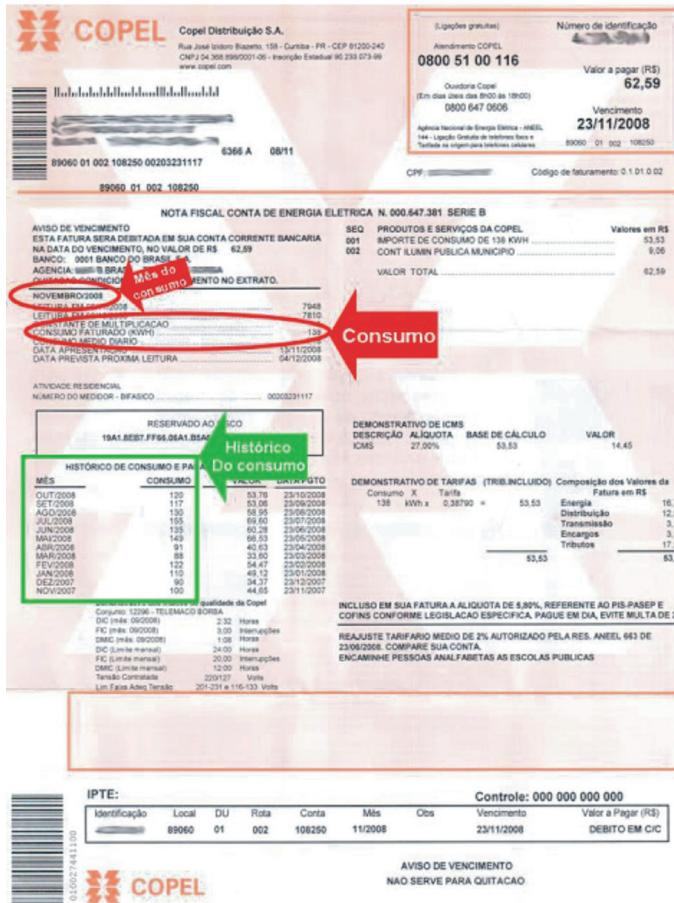


Figura 20 – Conta de energia elétrica: energia dissipada em kWh

A potência consumida por um aparelho elétrico também pode ser calculada pelo produto da tensão pela corrente, ou pelo produto da resistência pela corrente elevada ao quadrado:

$$Pot = Vi$$

OU

$$Pot = Ri^2$$

Assim, uma lâmpada incandescente, por exemplo, pode brilhar mais ou menos, dependendo da potência dissipada por ela. Nesse caso, o brilho da lâmpada vai depender da corrente elétrica que a atravessa e da tensão que lhe é aplicada.

19 ELETROMAGNETISMO

19.1 MAGNETISMO

O fenômeno magnético está relacionado com a capacidade que determinados materiais (ímãs) têm de atrair algumas ligas metálicas.

Essa característica dos ímãs, apesar de semelhante ao fenômeno elétrico, tem suas particularidades:

a) Diferentemente da carga elétrica que se apresenta ou positiva ou negativa, um ímã exibe regiões onde a intensidade da força de atração se mostra mais proeminente, nos dois polos magnéticos: um Norte e outro Sul (regiões opostas no ímã). Mesmo que quebremos um ímã, buscando separar os polos, as partes voltam a exibir ambas as polaridades, por isso, é impossível separarmos dois polos de um ímã, obtendo um monopolo magnético;

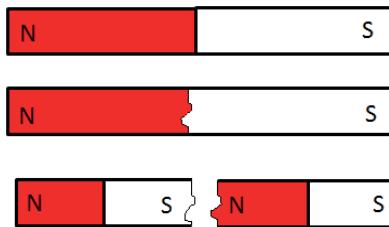


Figura 1 – Polos magnéticos num ímã

b) Os ímãs, quando dependurados por seu centro de massa e livres para girar para qualquer direção, tendem a se alinhar com a direção Norte- Sul geográfica do planeta Terra, ou seja, o polo que fica apontado para a direção Norte da Terra é denominado Norte Magnético, enquanto o polo que fica apontado para o Sul da Terra é chamado de Sul Magnético.

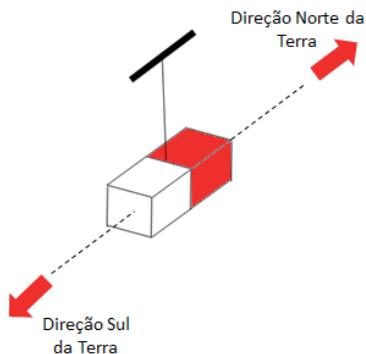


Figura 2 – Orientação do polo Norte do ímã com o Norte geográfico da Terra

c) Ao aproximarmos dois ímãs um do outro, dependendo das polaridades, podemos observar uma atração ou uma repulsão. Polos iguais (Norte-Norte; Sul-Sul) se repelem. Polos diferentes se atraem (Norte-Sul; Sul-Norte).

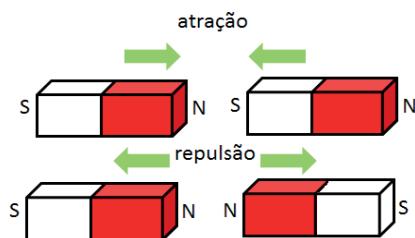


Figura 3 – Atração e repulsão de ímãs

Assim, sabendo que polos iguais se repelem e polos diferentes se atraem, conclui-se que a Terra é um grande ímã, cujo polo magnético Norte se situa no Sul geográfico e cujo polo magnético Sul se situa no Norte Geográfico.

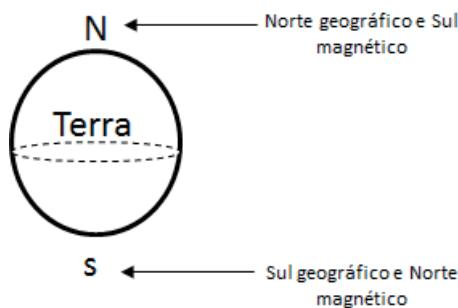


Figura 4 – Sul e Norte geográficos e Sul e Norte magnéticos da Terra

19.1.1 CAMPO MAGNÉTICO

Observando a disposição de limalhas de ferro distribuídas em torno de um ímã, é possível identificar linhas que sugerem a existência de um campo, o qual, por suas características específicas, recebe o nome de campo magnético.

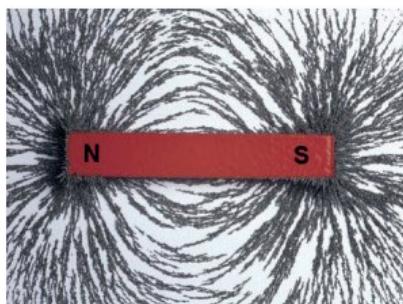
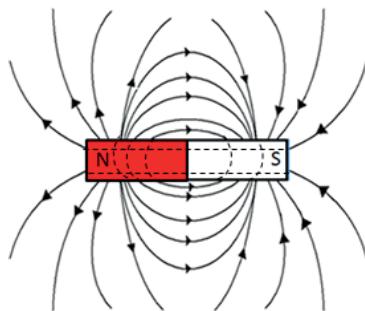


Figura 5 – Configuração das linhas de campo magnético

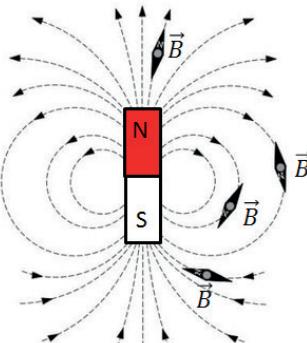
As linhas de campo magnético, diferentemente das linhas de força do campo elétrico, são contínuas (veja que elas continuam no interior do ímã, porém, se exteriorizam no polo Norte e são captadas no polo Sul).



Fonte: <http://fisicatresufpr.blogspot.com.br>(adaptado)

Figura 6 – Representação das linhas de campo magnético num ímá

Da mesma forma, podemos associar a essas linhas um vetor, denominado campo magnético \vec{B} , tangente a essas linhas de campo.



Fonte: <http://fisicatresufpr.blogspot.com.br>(adaptado)

Figura 7 – O vetor campo magnético é tangente às linhas de campo magnético

Para determinar a intensidade do vetor campo magnético \vec{B} , pode-se observar a interação entre o campo magnético sobre uma partícula eletrizada com carga q em movimento. Assim, tendo em vista que essa partícula tenha uma velocidade \vec{v} cuja direção forma um ângulo θ com o vetor campo magnético \vec{B} num ponto P do espaço, verifica-se uma força \vec{F} , perpendicular ao plano de \vec{v} e \vec{B} , atuando sobre a carga q com intensidade igual a

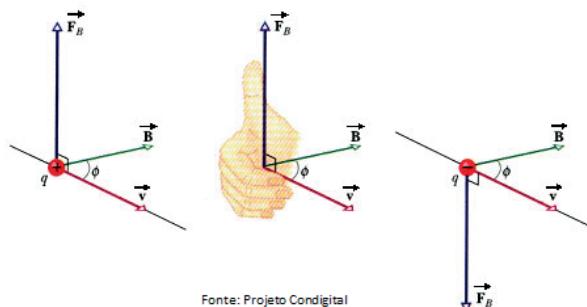


Figura 8 – Vetor força magnética atuando sobre uma partícula de carga q submetida a um campo magnético

$$F = qvB \sin\theta$$

Portanto,

$$B = \frac{F}{qv \sin\theta}$$

A unidade da intensidade do vetor campo magnético \vec{B} no Sistema Internacional de Unidades é: $\frac{N}{C \cdot \frac{m}{s}}$, também denominada de tesla (T), em homenagem ao físico Nikola Tesla.

Uma regra bastante utilizada para determinarmos a direção e o sentido da força \vec{F} que atua numa carga elétrica q com velocidade \vec{v} , devido ao campo magnético \vec{B} , é a da mão direita: imaginando que a carga q está na palma da mão direita, aponte seu dedo polegar no sentido do vetor velocidade \vec{v} e os demais dedos no sentido do campo magnético \vec{B} . Logo, perpendicularmente à palma da mão, temos o sentido da força.



Fonte: <http://rc.unesp.br>

Figura 9 – Regra da mão direita

Isso, se a carga q for positiva. Se for negativa, a força terá sentido contrário. Resumindo:

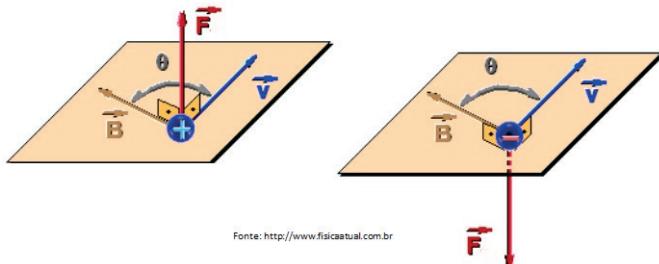


Figura 10 – Sentido da força para uma carga elétrica positiva e sobre uma carga elétrica negativa

Obs.: Uma representação muito comum do vetor campo magnético se configura quando temos que imaginar o vetor campo magnético entrando e saindo da folha de papel de nosso caderno. Nessa situação, utilizamos a seguinte convenção:

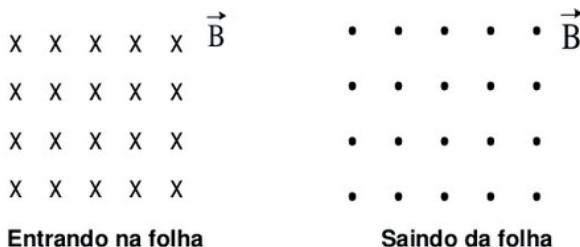
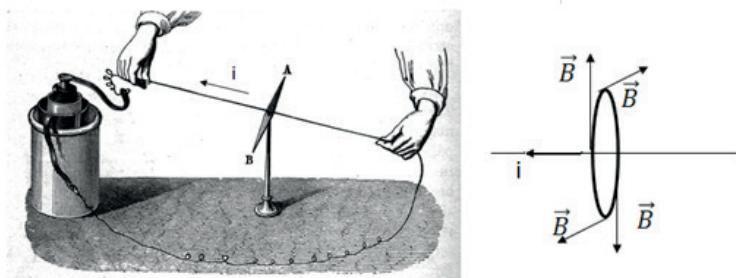
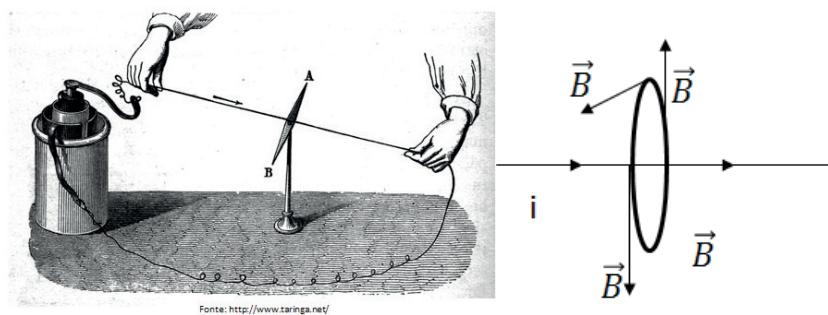


Figura 11 – Representação do campo magnético perpendicular ao plano do livro

Quando está entrando na folha, temos o X, que indica a parte de trás da seta do vetor. O ponto evidencia que a parte da frente da seta está vindo no sentido do leitor dessa folha.

19.2 A INTERAÇÃO CAMPO MAGNÉTICO E CORRENTE ELÉTRICA

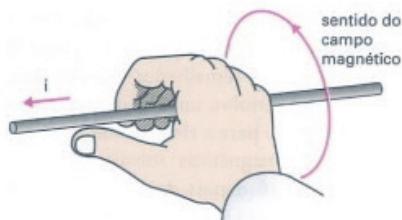
Cristian Oersted, físico dinamarquês, percebeu a existência de uma relação entre a eletricidade e o magnetismo. Numa de suas experiências, o cientista notou que um fio condutor, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, gerava, em torno de si, um campo magnético, cujo sentido dependia do sentido da corrente elétrica.



Fonte: <http://www.taringa.net/>

Figura 12 – Experimento de Oersted

O sentido das linhas de campos pode ser dado pela regra da mão direita: segura-se o fio com a mão direita, de tal forma que o dedo polegar aponte para o sentido da corrente. Assim, os demais dedos, em torno do fio, indicarão o sentido das linhas de campo magnético.



Fonte: <http://www.infoescola.com>

Figura 13 – Regra da mão direita para determinação do campo magnético estabelecido por uma corrente que passa por um condutor retilíneo.

O físico francês André-Marie Ampère propôs a equação a seguir, a partir da qual é possível determinar a intensidade do vetor campo magnético \vec{B} num ponto P à distância d de um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica i.

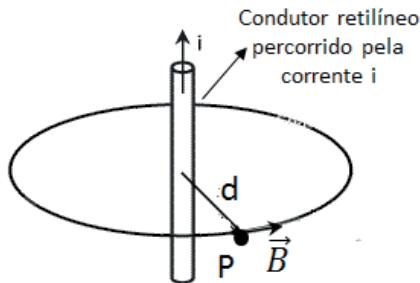


Figura 14 – Campo magnético estabelecido num ponto P por uma corrente que passa por um condutor retilíneo.

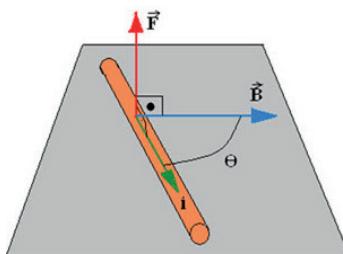
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}$$

Sendo μ_0 a permeabilidade magnética do ar, cujo valor dado em unidades do Sistema Internacional (SI) é $4\pi \times 10^{-7} T \frac{m}{A}$

19.2.1 FORÇA SOBRE UM CONDUTOR PERCORRIDO POR UMA CORRENTE ELÉTRICA

Vimos que uma carga q em movimento, que atravessa um campo magnético \vec{B} com uma velocidade \vec{v} , é submetida a uma força \vec{F} . Vimos ainda que um condutor elétrico, percorrido por uma corrente elétrica i, gera em torno de si um campo magnético \vec{B} .

Na sequência, considere um condutor de comprimento l , percorrido por uma corrente elétrica i, gerando um campo magnético \vec{B} . Qual a força atuará sobre esse condutor?



Fonte: <http://www.mundoeducacao.com>

Figura 15 – Força atuando sobre um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica

Considerando α o ângulo entre o campo magnético e o comprimento do condutor, temos:

$$F = ilBs \operatorname{sen}\alpha$$

Se tivermos dois condutores elétricos paralelos, separados por uma distância d , ambos com comprimento l_1 e l_2 muito grande, percorridos por uma corrente elétrica i , teremos a atração mútua dos condutores:

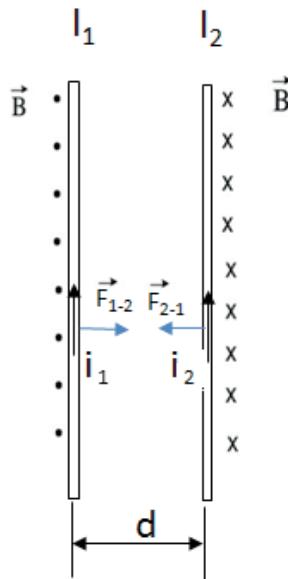


Figura 16 – Força atuando sobre dois condutores retilíneos percorridos por corrente elétrica de mesmo sentido

Se um dos condutores for percorrido por uma corrente em sentido contrário ao do outro, teremos uma repulsão:

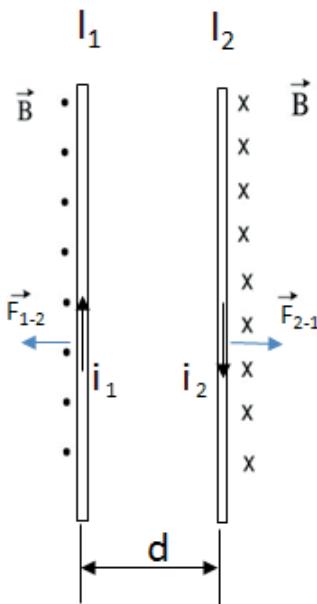


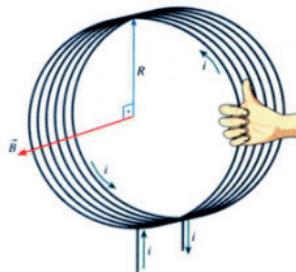
Figura 17 – Força atuando sobre dois condutores retilíneos percorridos por corrente elétrica de sentidos contrários

A intensidade das forças $\vec{F}_{1-2} = \vec{F}_{2-1} = \vec{F}_\square$ pode ser calculada pela equação:

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi d}$$

19.2.2 CORRENTE ELÉTRICA PERCORRENDO UM CONDUTOR NA FORMA DE UMA BOBINA E DE UM SOLENOÍDE

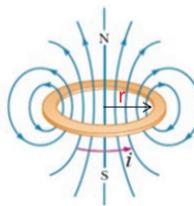
Considere um condutor enrolado na forma circular. Nesse caso, temos uma bobina circular. Cada volta de condutor que compõe a bobina recebe o nome de espira da bobina.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 18 – Bobina e suas várias espiras

Se uma espira, de raio r , for percorrida por uma corrente elétrica i , temos a produção de um campo magnético:



Fonte: Projeto Condigital

Figura 19 – Campo magnético gerado pela passagem de uma corrente elétrica em uma espira

Por simetria podemos determinar o módulo do campo magnético no centro da espira, pela expressão

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

Se, ao invés de uma espira, a bobina for composta de N espiras, temos que o módulo do vetor campo magnético no centro da espira vale

$$B = N \frac{\mu_0 i}{2r}$$

Se uma corrente elétrica percorrer essa bobina enquanto ela é atravessada por um campo magnético perpendicular, temos o princípio de funcionamento de um motor elétrico:

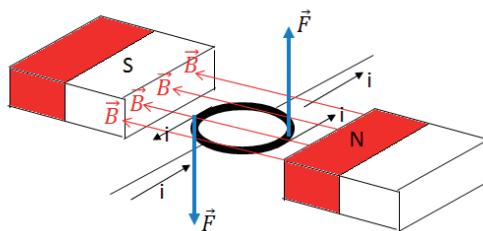
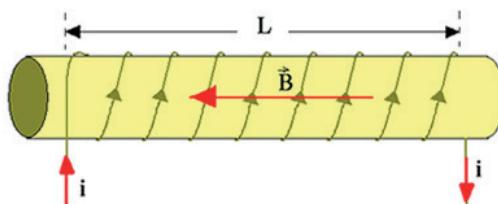


Figura 20 – Princípio básico do esquema de funcionamento de um motor elétrico

Se, ao invés de enrolar o condutor de forma circular, ele for enrolado na forma espiral, temos o que é denominado solenoide:



Fonte: <http://www.brasiscola.com/fisica>

Figura 21 – Um solenoide

Nesse caso, a intensidade do campo magnético pode ser determinada pela equação

$$B = \frac{N}{L} \mu_0 i$$

onde N é o número de espiras.

19.3 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

19.3.1 FLUXO MAGNÉTICO

Considere uma espira de área, A, mergulhada num campo magnético constante \vec{B} .

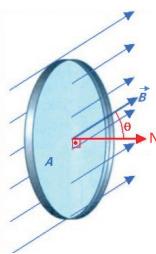


Figura 22 – Espira mergulhada em um campo magnético constante

Pode-se definir a grandeza escalar fluxo magnético, Φ , a qual está relacionada com o número de linhas de campo magnético que atravessa a área A desta espira: quanto maior é o número de linhas de campo que a atravessa, maior é esse fluxo.

Sendo θ o ângulo entre o vetor \vec{B} e o segmento normal (N), linha normal à superfície da espira tomada como referência, podemos calcular o fluxo magnético da espira como sendo:

$$\Phi = B \cdot A \cos\theta$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a grandeza fluxo magnético é dada em $T \cdot m^2$, que é igual a 1 Wb (weber), em homenagem ao físico alemão Wilhelm Weber.

Obs.: Dois casos importantes no cálculo do fluxo magnético:

a) Quando a superfície da espira forma um ângulo de 0° com as linhas de campo:

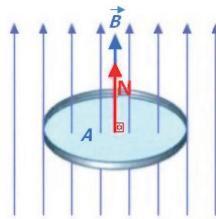


Figura 23 – Espira sendo atravessada por linhas de campo magnético que formam, com a linha normal à superfície, um ângulo de 0°

Nesse caso, como $\cos 0^\circ = 1$, temos

$$\Phi = B \cdot A$$

b) Quando a superfície da espira forma um ângulo de 90° com as linhas de campo da superfície:

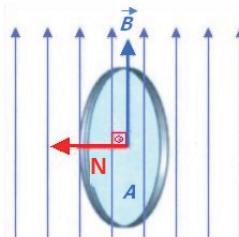


Figura 24 – Espira sendo atravessada por linhas de campo magnético que formam, com a linha normal à superfície, um ângulo de 90°

Nesse caso, como $\cos 90^\circ = 0$, temos

$$\Phi = 0$$

ou seja, nenhuma linha de campo atravessa a espira.

19.3.2 LEI DE FARADAY E LEI DE LENZ

O físico inglês Michel Faraday, em suas experiências, percebeu que, ao realizar um movimento relativo entre uma bobina e um ímã, ocorre o aparecimento de uma corrente elétrica induzida na bobina.

Como já sabemos do capítulo referente à eletrodinâmica, uma corrente surge quando uma força eletromotriz \mathcal{E} é estabelecida, tendo em vista que não há movimento de cargas sem energia. Faraday, portanto, deduziu que o movimento relativo ímã-bobina não gerava apenas uma corrente induzida, mas também uma força eletromotriz induzida (fem), a qual se origina da energia cinética proveniente do movimento relativo ímã-bobina.

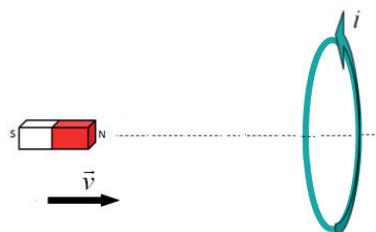


Figura 25 – Ímã se aproximando de uma bobina gerando uma corrente elétrica induzida

Assim, Faraday concluiu que, num circuito fechado submetido à variação de um fluxo magnético, surge uma corrente induzida, devido à indução de uma fem.

Dessa maneira, podemos escrever matematicamente a Lei de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Se, ao invés de uma espira, tivermos uma bobina com N espiras, teremos:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

O sinal negativo da equação deve-se à Lei de Lenz. Heinrich Lenz percebeu que a corrente elétrica induzida gerada pelo movimento relativo ímã-bobina atua no sentido de gerar um campo magnético na bobina que se opõe ao movimento relativo, exigindo a realização de trabalho.

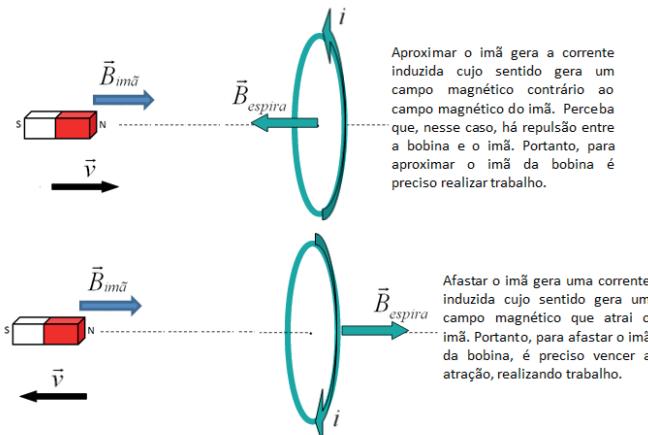


Figura 26 – Ímã se aproximando e se afastando de uma bobina gerando corrente elétrica induzida em sentidos contrários

Em resumo, pode-se afirmar que a Lei de Lenz evidencia uma consequência da Lei de Conservação da Energia, pois, sem a oposição do campo magnético à variação do fluxo magnético que gera a corrente induzida, teríamos um moto-perpétuo, quer dizer, geraríamos energia do nada.

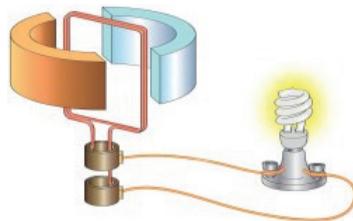
19.4 APLICAÇÕES DAS LEIS DE FARADAY E LENZ

Com base nos estudos relativos à indução eletromagnética, foi possível a realização de diferentes aplicações importantes; dentre elas, podemos destacar os

geradores eletromagnéticos, também chamados de dínamos, e os transformadores de tensão.

19.4.1 GERADORES ELETROMAGNÉTICOS

Vimos que, pelas Leis de Faraday e Lenz, podemos gerar força eletromotriz se variarmos o fluxo magnético que atravessa uma espira. Nesse caso, se mergulharmos uma bobina, formada por N espiras, num campo magnético e girá-la, teremos a geração de uma fem e, consequentemente, de uma corrente elétrica.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 27 – Esquema de um gerador eletromagnético

As usinas hidrelétricas utilizam esse princípio para gerar a energia elétrica disponível em nossas residências.

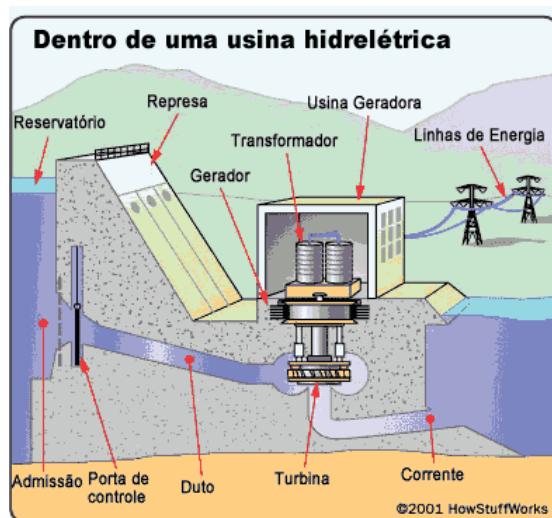


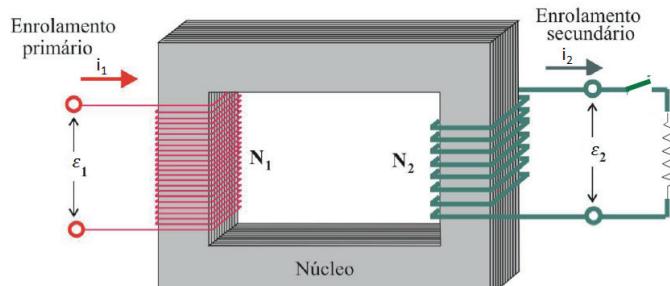
Figura 28 – Esquema de uma usina hidrelétrica

A energia potencial da água represada se transforma em energia cinética e gira as pás, as quais, por sua vez, movem grandes bobinas que geram a fem.

19.4.2 TRANSFORMADORES DE TENSÃO

Considere uma bobina ligada a um gerador que faz circular por ela uma corrente elétrica alternada. Ela vai gerar uma corrente elétrica induzida e uma fem induzida, também alternada.

É assim que funciona um transformador de tensão elétrica. Nele, a bobina que está ligada à fem alternada é chamada de enrolamento primário. A bobina onde surge a fem alternada induzida é o enrolamento secundário.



Fonte: Projeto Condigital

Figura 29 – Esquema de um transformador de tensão elétrica

Empregando-se um núcleo de ferro para enrolar as bobinas, ajudando a confinar o campo magnético entre elas e evitando, assim, perdas, podemos escrever que

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

onde:

ε_1 é a fem alternada na bobina 1

ε_2 é a fem induzida alternada na bobina 2

N_1 é o número de espiras na bobina 1

N_2 é o número de espiras na bobina 2.

i_1 é a corrente elétrica alternada na bobina 1

i_2 é a corrente elétrica alternada induzida na bobina 2





Cadernos dos Cursinhos Pré-Universitários da UNESP