UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

MARCOS PAULO BALISCEI

EXPLICANDO A MICROGRAVIDADE

MARINGÁ
2011

MARCOS PAULO BALISCEI

EXPLICANDO A MICROGRAVIDADE

Monografia apresentada como parte dos requisitos necessários para a conclusão do curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Ary de Araújo Rodrigues Jr.

MARINGÁ
2011

MARCOS PAULO BALISCEI

EXPLICANDO A MICROGRAVIDADE

Monografia apresentada como parte dos requisitos necessários para a conclusão do curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual de Maringá.

Aprovada em 30/11/2011.

BANCA EXAMINADORA

_____

Ary de Araújo Rodrigues Jr.

_____

Luiz Fernando Cótica

_____

Luiz Roberto Evangelista

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcos e Solange, por todo o apoio e esforço para me transmitir os valores que me tornaram a pessoa que sou hoje.

Ao professor Ary, pela orientação durante a realização deste trabalho. Sua ajuda foi fundamental para chegar a estes resultados.

Aos professores do Departamento de Física, responsáveis pela minha formação durante o curso.

Aos colegas de curso, tanto aos que me acompanharam até o final quanto aos que por algum motivo acabaram abandonando o curso durante o caminho.

Aos amigos, que me deram forças em diversas situações: Renato, Ana, Jaozão, Nilva, Fábio, Fran, Rogério, Wagner, Cueio, Anny, Cristiano, Jlhuly, Marcelo Pavesi, Camila, Jair, Claudio, Zaninello, Dô, Karina, Marcio, Vanessa, Wania, Lucy, Erika, Aryadne, Denise, Bia, Leticia, Raphaela, Edna, Raquel, Fernando Fefê, Ariane, Rodrigo, Tatá, Marcelo Pompom, Dani, Margosa, Eline, Carlinho Rossi, Gaganhão, Spy, Alisson, Italo, Giovani, Gilgás, Tripa, Psy, Muriel, Leo Montovaneli, Dadá, Iago, Jean, Rennan, Du Japonês, Nathan, Julio Tubaína, Menon, Marlon, Gabriel, João Pedro, Mauro, Marcelo, Vadinho, Murilo Pinelli, Nenê, Gisele, Robertinho, Daniel, Jão, Jafer, Daiani, Jader, Edimar, Muriel, Juninho, Murilo, Bruna, Heverton, Davi, Luan, Gugão, Iasmyn, Vozão, Boca, Shel, Marcelo Franja, Lela, Julião, Gelinho, Leo, Enrique, Pochô, Adriano, Jaozinho, Henrique, Jaqueline, Zé, Jaque, Boy, Du, Carlinho Baldin, Clodoaldo, Marcinho, Lunar, Aline, Nathalia, Biro, Tigremo, Valdecir, Moscão, Marcelo Magalhães, Emerson, Gustavo, Sombra, Steven, Michel, entre outros.

A Layne, Jerry, Mike, Sean, Dime, Phil, Rex e Vinnie, pela trilha sonora durante a realização deste trabalho.

Eu acho que posso ir a qualquer lugar que eu quiser, se eu apenas souber aonde ir.

Layne Staley

RESUMO

São propostas algumas atividades experimentais de baixo custo e fácil realização, para reproduzir o ambiente de microgravidade presente nas naves espaciais, torres de queda livre e vôos parabólicos de aeronaves. O objetivo é proporcionar material didático de apoio ao professor em termos de instruções para a montagem e para a execução destes experimentos, além das devidas explicações acerca dos resultados. Os experimentos são baseados no conceito de queda livre e são registrados em imagem em vários momentos da queda, o que torna possível a observação de fenômenos curiosos neste ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Gravidade, Microgravidade, Experimento, Queda Livre.

ABSTRACT

Some experimental activities of low cost and easy accomplishment are proposed to reproduce the microgravity environment that exists in space ships, free fall towers and parabolic flights. The objective is to provide didactical material to aid teachers in terms of assembling instructions, besides the implementation of these experiments and explanation of the results. The experiments were based on the free fall concept and were recorded in several stages of their falls, making it possible the observation of curious phenomena in this environment.

KEYWORDS: Gravity, Microgravity, Experimental Activity, Free Fall.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7
2 GRAVIDADE 8
2.1 O EXEMPLO DO ELEVADOR 9
3 MICROGRAVIDADE 16
3.1 CRIANDO AMBIENTES DE MICROGRAVIDADE 20
4 PROPOSTA EXPERIMENTAL 24
4.1 A CHAMA DE UMA VELA 24
4.2 O FILETE DE UM LÍQUIDO 30
4.3 O PRESENTE DE ANIVERSÁRIO DE EINSTEIN 32
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS 38
5.1 A CHAMA DE UMA VELA 38
5.2 O FILETE DE UM LÍQUIDO 39
5.3 O PRESENTE DE ANIVERSÁRIO DE EINSTEIN 40
6 CONCLUSÃO 42
7 REFERÊNCIAS 44

1 INTRODUÇÃO

Em filmes sobre viagens espaciais é comum a aparição de cenas onde uma nave tripulada está viajando pelo espaço e sua tripulação, assim como todos os objetos no interior da nave, estão flutuando, como se não houvesse força gravitacional. Além dos filmes, este fenômeno se mostra presente também em imagens gravadas no interior de espaçonaves lançadas da Terra em direção ao espaço, levando à falsa conclusão de que não existe gravidade no espaço, contrariando a Lei da Gravitação Universal de Newton.

Este fenômeno que ocorre nos filmes e nas viagens espaciais é chamado Microgravidade. Mas o que é microgravidade? Como ocorre este fenômeno? Como outros fenômenos se comportam na presença de microgravidade?

O objetivo deste trabalho é responder a estas perguntas e apresentar algumas propostas experimentais com a finalidade de reproduzir em pequena escala o ambiente de microgravidade, presente nas torres de queda livre e aeronaves orbitando em torno da Terra.

Os experimentos propostos não apresentam muitas novidades conceituais ao aluno. De fato, uma situação similar aos experimentos é apresentada ao aluno, de forma teórica, no exemplo clássico do elevador. O exemplo consiste em uma pessoa sobre uma balança, no interior do elevador, estando parado. Em seguida, são apresentadas situações onde o elevador sobe ou desce, resultando em alterações na medida apresentada pela balança, de acordo com o movimento do elevador. Também é estudada a situação onde o cabo do elevador se rompe, e o elevador passa a se mover em queda livre.

Utilizando-se dos mesmos conceitos presentes no exemplo do elevador, especificamente no caso onde o cabo se rompe e ocorre a queda livre, é possível recriar tal situação através de um experimento simples. Porém, este experimento não se limita a demonstrar o efeito da diminuição do peso aparente observado em uma balança. Pode-se adaptar o experimento para observar a atuação de outros fenômenos físicos em um ambiente de microgravidade, e comparar os resultados obtidos com o resultado apresentado em um ambiente normal.

Os experimentos são apropriados para a realização em sala de aula, por serem de realização simples, com materiais de fácil aquisição e baixo custo, além de providenciar ao aluno um contato com o aprendizado de Física através da realização de experimentos.

2 GRAVIDADE

A gravidade é um dos quatro tipos de forças fundamentais existentes no universo, juntamente com as forças nucleares fortes e fracas e a força eletromagnética.

No século XVII, Isaac Newton publicou uma importante generalização que descrevia matematicamente a força de atração gravitacional, presente em todo o universo. Em parte de sua primeira Lei, a Lei da Inércia, Newton descreve que um corpo em movimento se move em linha reta e com velocidade constante, a menos que forças externas atuem sobre o corpo. Desta forma, os planetas deveriam se mover em linha reta, porém desde os tempos de Aristóteles era conhecido que os planetas se moviam em caminhos circulares. Para Newton, as órbitas fechadas dos planetas eram resultantes de forças atuando em cada um dos planetas. Esta força é a mesma que atrai um objeto em direção ao chão, ao ser solto em queda livre: a gravidade.

De acordo com a Lei da Gravitação Universal de Newton, toda massa existente no universo atrai outras massas. Esta força atrativa entre as massas é diretamente proporcional ao produto destas massas, e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa. Esta relação pode ser escrita através da seguinte equação:

$$F \alpha \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Através desta relação, pode-se concluir que, quanto maior a massa dos corpos que se atraem, maior a força de atração entre eles. Pode-se também concluir que, quanto menor a distância entre os corpos, maior a força de atração.

No século XVIII, Henry Cavendish quantifica a Lei da Gravitação Universal de Newton. Ao medir a força de atração de dois corpos de 1 quilograma cada, separados pela distância de 1 metro, Cavendish obteve uma força de atração extremamente fraca, mas que determinou a relação de proporcionalidade presente na Lei, convertendo-a em uma equação. A medida de Henry definiu o valor da constante universal gravitacional, *G*, como sendo igual a $6{,}67 \times 10^{-11}\ Nm^2/kg^2$. Assim, a Lei da Gravitação Universal de Newton é representada pela equação

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

A presença da Terra cria um campo gravitacional responsável por atrair os objetos em direção a ela, assim como cada objeto também atrai a Terra. A força peso, existente em cada corpo na superfície terrestre, é resultado da atração que a Terra exerce em cada corpo. Esta força depende da massa do corpo, assim como da aceleração que este corpo atinge quando em queda livre, dada por $g = 9{,}8\ m/s^2$, sendo igual para todos os corpos (NUSSENZVEIG, 2002).

A massa de um corpo é constante, assim como seu peso, desprezando-se as pequenas diferenças em g apresentadas de acordo com diferentes altitudes na superfície terrestre. Porém, é possível criar um ambiente onde o peso aparente de um objeto mude. Para exemplificar a criação de ambientes onde o peso aparente de um objeto não é igual ao seu peso real, pode-se utilizar o exemplo do elevador.

2.1 O EXEMPLO DO ELEVADOR

O exemplo do elevador é um exemplo introduzido durante o estudo das Leis de Newton, ao se estudar a força de apoio de um corpo sobre uma superfície, também chamada força normal, representada pela letra *N*. Anteriormente a este exemplo, os exemplos estudados trazem a força normal como uma força de mesma intensidade e direção que a força peso, representada pela letra *P*, porém com sentido oposto, como mostra a Figura 1.

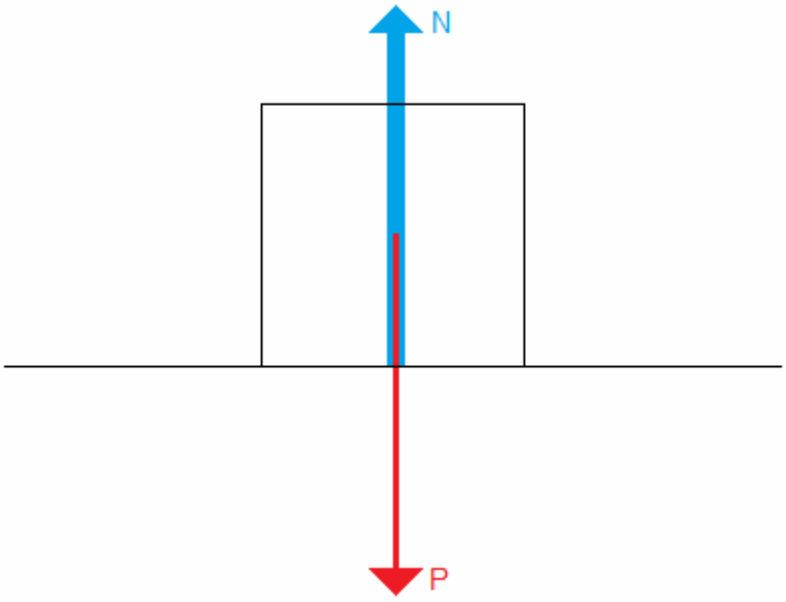

Figura 1: Forças atuantes em um corpo parado.

Em outras situações, as características vetoriais da força normal diferem das características vetoriais da força peso. No caso do elevador, a direção da força normal é mantida como sendo a mesma da força peso, com sentido oposto, e é variada a intensidade da força normal, de acordo com cada situação apresentada no exemplo.

É apresentada a seguinte situação: uma pessoa, de massa *m*, está no interior de um elevador, sobre uma balança. Esta balança indica o peso aparente desta pessoa, ou seja, o peso que a pessoa julga ter em cada situação do exemplo. Este peso aparente indica a intensidade da força de apoio *N*. O sistema é representado pela Figura 2.

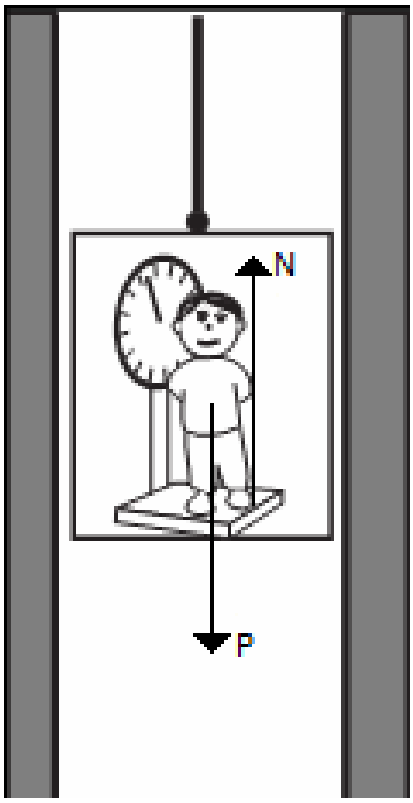

Figura 2: Uma pessoa no interior de um elevador.
Fonte: ROGERS; VOGT; WARGO, 1997, adaptação do autor.

A **primeira situação** a ser estudada é quando o elevador está parado. Considerando a pessoa no interior do elevador como sendo uma partícula e o referencial fixo em relação à Terra, pode-se construir o diagrama de forças atuantes na pessoa, como mostra a Figura 3.

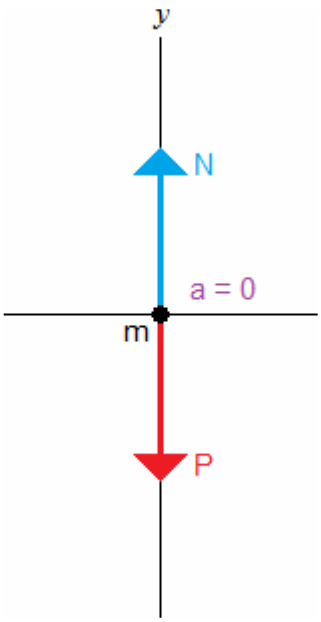

Figura 3: Diagrama de forças atuantes, quando o elevador está parado.

Aplicando a segunda lei de Newton, tem-se

$$N - P = ma,$$

onde a é a aceleração apresentada pelo elevador. Tem-se que o peso é dado pelo produto entre a massa da pessoa e a aceleração gravitacional local g, portanto pode-se escrever a equação como

$$N - mg = ma$$

ou

$$N = m\,(g + a). \quad (1)$$

Como o elevador está parado, a pessoa também está parada, e $a = 0$. Assim, para o elevador parado, tem-se

$$N = mg. \quad (2)$$

Conclui-se que, para o elevador parado, o peso aparente indicado pela balança é igual ao peso real da pessoa, dado pelo produto mg.

A **segunda situação** apresentada é quando o elevador se move com velocidade constante. Esta situação pode ser dividida entre subida e descida do elevador, porém apresenta o mesmo resultado para ambos os sentidos do movimento. Como o elevador se move com velocidade constante, tem-se $a = 0$, e a situação se mostra igual à situação anterior, com o elevador parado. Assim, o diagrama de forças é o mesmo mostrado na Figura 3, e o peso indicado pela balança pode ser obtido através da equação (2).

A **terceira situação** apresenta o elevador subindo acelerado. Através da equação (1) conclui-se que o peso aparente da pessoa aumenta quando o elevador sobe acelerado, pois a massa m é multiplicada pela soma da aceleração gravitacional e a aceleração do elevador. O diagrama de forças é dado pela Figura 4.

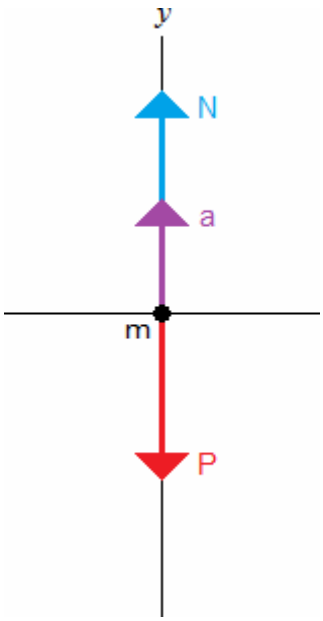

Figura 4: Diagrama de forças atuantes, quando o elevador sobe acelerado.

Na **quarta situação**, o elevador desce acelerado. Através da equação (1), tem-se

$$N = m\,(g - a). \quad (3)$$

Observa-se que o peso aparente indicado pela balança é menor que o peso real da pessoa. O diagrama de forças é mostrado na Figura 5.

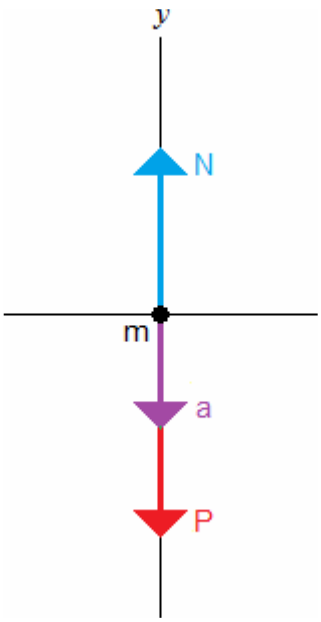

Figura 5: Diagrama de forças atuantes, quando o elevador desce acelerado.

Duas possíveis situações a serem acrescentadas ao exemplo são o elevador subindo e desacelerando até parar, e o elevador descendo e desacelerando até parar. Para o elevador subindo e desacelerando, tem-se aceleração negativa, e a situação mostra-se igual à quarta situação apresentada, com o diagrama de forças dado pela Figura 5 e o peso aparente dado pela equação (3). Para o elevador descendo e desacelerando, a aceleração é positiva, e a situação mostra-se igual à terceira situação estudada, com o diagrama de forças dado pela Figura 4 e o peso aparente dado pela equação (1).

A **quinta situação**, e a mais interessante para este trabalho, é quando o elevador está parado e o cabo que o sustenta se rompe. O elevador entra então em queda livre, assim como a pessoa no interior do elevador. Tem-se então $a = -g$ e, pela equação (1),

$$N = 0.$$

Logo, a balança indica peso aparente igual à zero na situação de queda livre. Nesta situação, a pessoa se sente como se não possuísse peso. Na órbita da Terra, esta é a mesma sensação experimentada por astronautas. A sensação de falta de peso não se dá pela ausência da força gravitacional, pois a mesma não se faz ausente, mas sim pelo fato de que a pessoa e o seu veículo estão em queda livre com a mesma aceleração.

O diagrama de forças é dado pela Figura 6.

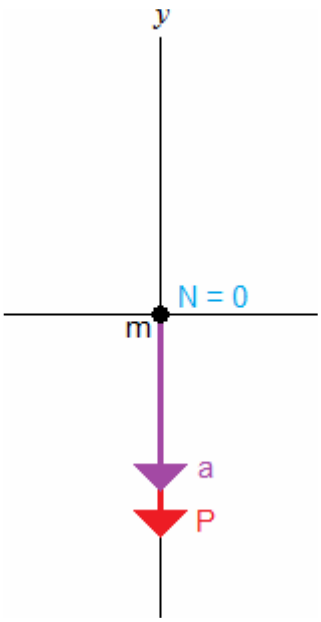

Figura 6: Diagrama de forças atuantes, para o elevador em queda livre.

Outra situação interessante é quando o elevador é puxado para baixo e apresenta aceleração maior que a da gravidade. Através da equação (1), tem-se

$$N = m\,(-g - a),$$

que pode ser reescrita como

$$N = -\,m\,(g + a).$$

Neste caso, tem-se uma força de apoio negativa, ou seja, a pessoa perderia o contato de seus pés com o elevador, e subiria até atingir o teto do elevador, empurrando-o com uma força $m\,(g + a)$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996).

O diagrama de forças para esta situação é mostrado na figura 7.

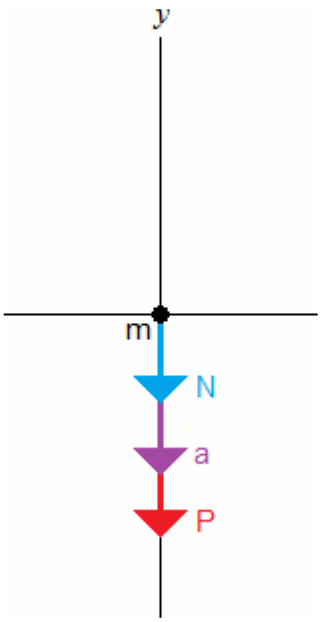

Figura 7: Diagrama de forças atuantes, para o elevador descendo com aceleração maior que a da gravidade.

3 MICROGRAVIDADE

A quinta situação analisada do exemplo do elevador apresenta uma situação particular, onde o peso aparente da pessoa no interior do elevador é nulo. Isto caracteriza um ambiente de microgravidade. Por definição, um ambiente de microgravidade é aquele onde o peso aparente de um sistema é muito pequeno, comparado com o seu peso real. A qualidade deste ambiente de microgravidade depende do mecanismo usado para criá-lo. No exemplo do elevador, estudado teoricamente, é produzido um ambiente onde o peso aparente é nulo. Na prática, é possível obter ambientes onde a microgravitade corresponde a aproximadamente 1% da aceleração gravitacional terrestre, através de vôos parabólicos em aeronaves, até 1 x 10^{-4} % da aceleração gravitacional terrestre, através de satélites em órbita.

Matematicamente, o prefixo micro significa uma parte em um milhão, ou 10^{-6}, de um todo. Assim, a aceleração gravitacional em um ambiente de microgravidade necessitaria ser um milionésimo da aceleração gravitacional no ambiente da atmosfera terrestre. Ao aplicar o termo microgravidade, é usada a definição literal do prefixo micro-, palavra derivada do grego mikros, que significa pequeno. Assim, um ambiente de microgravidade não necessita que a aceleração da gravidade seja reduzida por um fator de 10^{6}, como o prefixo micro- sugere matematicamente, mas sim necessita apenas que o peso aparente de um sistema seja muito menor que seu peso real (ROGERS; VOGT; WARGO, 1997).

O termo gravidade zero não é um termo correto para representar um ambiente de microgravidade, pois mesmo que a atração gravitacional em relação à Terra seja reduzida a um valor muito pequeno, este valor não será nulo. Além disto, existem ainda as atrações gravitacionais provindas do Sol, dos planetas próximos da Terra, e da Lua (NASA, 1996).

Pode-se demonstrar o efeito da microgravidade através de um exemplo simples. Uma pedra, em queda livre, obedece à equação

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 ,$$

onde x é a posição da pedra, x_o é a posição inicial da pedra, v_o é a velocidade inicial da pedra, t é o tempo de queda e a é a aceleração obtida pela pedra, que neste caso é a aceleração gravitacional. Assim, para a pedra em queda livre, tem-se $v_o = 0$, e utilizando como referencial a posição inicial da pedra, tem-se $x_o = 0$, e a equação se reduz a

$$x = \frac{1}{2}at^2 .$$

Pode-se reescrever a equação da seguinte maneira:

$$t = \left(2\frac{x}{a}\right)^{\frac{1}{2}} . \quad (4)$$

Em ambiente terrestre, tem-se $a = g = 9{,}8\ m/s^2$. Assim, para uma queda de 5 metros de altura, tem-se, pela equação (4):

$$t = \left(2\frac{5}{9{,}8}\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$t = 1{,}021^{\frac{1}{2}}$$
$$t = 1{,}011s .$$

Em um ambiente de microgravidade onde a aceleração gravitacional é equivalente a 1% da aceleração gravitacional terrestre, ou seja, $a = g \times 10^{-2}$, tem-se, pela equação (4):

$$t = \left(2\frac{5}{9{,}8x10^{-2}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$t = 102{,}041^{\frac{1}{2}}$$
$$t = 10{,}102s .$$

Em um ambiente de microgravidade onde a aceleração gravitacional é equivalente a um milionésimo da aceleração gravitacional terrestre, tem-se, pela equação (4):

$$t = \left(2\frac{5}{9{,}8x10^{-6}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$t = 1020408{,}163^{\frac{1}{2}}$$
$$t = 1010{,}153s .$$

Um ambiente de microgravidade mostra grande diferença no tempo de queda em um movimento de queda livre, ao ser comparado com um ambiente normal, porém os efeitos da microgravidade não se limitam a aparecer apenas no movimento de queda livre. A atuação da força gravitacional atua em fenômenos estudados na superfície terrestre, de forma a influenciar no resultado dos experimentos e estudos. Em alguns casos, a atuação da força gravitacional é usada como vantagem ao realizar um experimento, e em outros casos, a atuação da força gravitacional dificulta a execução do experimento ou a análise dos resultados.

Dentre as áreas estudadas em ambientes de microgravidade estão a Biotecnologia, Física dos Fluidos, Física Fundamental, Ciência de Combustão e Ciência de Materiais.

Biotecnologia é uma ciência aplicada, envolvendo pesquisas, manipulação e criação de tecidos, moléculas e organismos, atuante nas áreas da saúde, agricultura e proteção ambiental. Sob ambiente de microgravidade, são estudados a Biologia Fundamental, o crescimento de cristais de proteínas, e o cultivo de células e tecidos de mamíferos. Para se estudar cristais de proteína através de difração de raios-X são necessários cristais homogêneos de tamanho aproximado ao de um grão de sal de cozinha. A atuação da força gravitacional influencia no crescimento dos cristais de maneira a causar defeitos e reduzir a homogeneidade, enquanto os cristais em ambiente de microgravidade se tornam maiores e mais homogêneos. Nos tecidos e células de mamíferos, a força gravitacional influencia negativamente no cultivo em laboratório. Enquanto em um corpo vivo o crescimento de células e tecidos ocorre de maneira tridimensional, em laboratório o cultivo é afetado pela força gravitacional, forçando os tecidos e células contra o fundo dos recipientes nos quais eles estão contidos. Existem sistemas para melhor cultivo de células e tecidos em ambiente terrestre, além de um bioreator destinado a estudos de crescimento de células e tecidos em ambiente de microgravidade.

Em combustões a microgravidade é utilizada para melhorar o conhecimento deste fenômeno, que em ambiente terrestre é largamente influenciado pela gravidade. Por exemplo, combustão produz ar quente, menos denso que o ar frio ao seu redor. Devido à força gravitacional, o ar menos denso desce e entra em contato com o ar quente gerado pela combustão, se misturando a ele e gerando uma corrente de ar conduzida pela gravidade, e impedindo o estudo do resultado da combustão. Em ambiente de microgravidade, esta corrente de ar conduzida pela gravidade é significantemente reduzida, facilitando os experimentos em serem descritos matematicamente. Além disto, fenômenos como o comportamento do ar aquecido após a combustão, são mais facilmente estudados, devido a esta diminuição de correntes de ar propiciar experimentos de maior duração. Os resultados

destes estudos são aplicados no controle de poluentes gerados pela combustão, assim como na eficiência da combustão.

Nos fluidos a Física busca entender os princípios atuantes neles, desde a escala microscópica até a escala atmosférica. O estudo de fluidos em ambiente de microgravidade possibilita melhor análise de fenômenos cuja gravidade exerce influência. Em microgravidade, os fluidos se tornam mais estáveis, e as transições de estados físicos são mais facilmente analisadas. Na Engenharia Civil, a compreensão do comportamento dos fluidos ajuda a desenvolver construções mais seguras em áreas onde ocorrem terremotos, visto que o solo se comporta como fluido em situações como terremotos e enchentes. Ao compreender melhor a transferência de calor nos fluidos, podem-se construir sistemas melhores de refrigeração, e aumentar a estabilidade e desempenho em usinas, reduzindo o custo para gerar energia elétrica.

Na Física Fundamental, os mesmos experimentos realizados em atmosfera terrestre oferecem uma possibilidade maior de medidas e coleta de dados em ambiente de microgravidade, levando a uma compreensão mais precisa de certos fenômenos, e a descobertas em outros fenômenos. Um dos avanços mais importantes da Física Atômica foi a demonstração de que um uma amostra atômica diluída pode ser resfriada através de luz laser, com a temperatura ficando próxima do zero absoluto em uma escala de micro-graus a nano-graus. Nesta temperatura, a velocidade dos átomos cai de centenas de metros por segundo para centímetros ou milímetros por segundo, possibilitando medidas mais precisas das propriedades atômicas. Em ambiente microgravitacional, a influência da gravidade no movimento dos átomos é reduzida, propiciando medidas ainda mais precisas. Dentre os objetivos mais importantes desta pesquisa, está o desenvolvimento de relógios de altíssima precisão, cruciais para a comunicação e navegação na Terra, ar e espaço.

A Ciência dos Materiais é um campo extremamente amplo que engloba o estudo de todos os materiais, incluindo a formação, estrutura e propriedades de materiais em várias escalas, desde a microscópica até a macroscópica. Um dos principais objetivos do estudo de materiais em microgravidade é compreender como a gravidade afeta a solidificação e crescimento cristalino dos materiais. A microgravidade também propicia o processamento de materiais sem utilizar recipientes para armazená-los. Ao utilizar-se de recipientes, pode ocorrer a contaminação dos materiais via contato com o recipiente. Além de evitar a contaminação dos materiais, existem casos em que é necessário um ambiente corrosivo, ou de alta temperatura, e os recipientes utilizados para armazenar materiais não suportam tais ambientes. Assim, alguns estudos são possíveis somente através do processamento de

materiais sem utilizar recipientes. Nos metais, a microgravidade propicia um estudo da solidificação, estrutura química e cristalina, diretamente ligados à características dos metais como a resistência mecânica e resistência à corrosão. Em Materiais Eletrônicos, como os semicondutores, é necessária a habilidade de manipular o crescimento cristalino e a estrutura química do material para obter melhores resultados. Visto que a gravidade afeta o crescimento cristalino e a estrutura química dos materiais, a microgravidade possibilita maior capacidade de manipular estas propriedades. Em vidros e cerâmicas, a microgravidade propicia pesquisas que ajudam a diminuir as imperfeições em sua fabricação. Entre as aplicações destes vidros e cerâmicas, estão as fibras de vidro usadas em telecomunicações, cerâmicas utilizadas em turbinas a gás, e ossos e dentes artificiais feitos de biocerâmica (ROGERS; VOGT; WARGO, 1997).

3.1 CRIANDO AMBIENTES DE MICROGRAVIDADE

Os ambientes de microgravidade podem ser criados de duas maneiras. Levando em consideração que a força gravitacional diminui à medida que a distância entre um corpo e a Terra aumenta, uma maneira de criar ambiente de microgravidade é afastar-se da Terra. Porém, para que a atração gravitacional seja reduzida a um milionésimo da atração gravitacional na superfície terrestre, é necessário haver uma distância de aproximadamente 6,37 milhões de quilômetros da Terra. Esta distância equivale a quase 17 vezes a distância Terra-Lua. Este método é possível apenas para espaçonaves não-tripuladas, visto que aeronaves tripuladas não viajam a distâncias muito maiores que a distância Terra-Lua.

O outro método para a criação de microgravidade é a queda livre. Na quinta situação analisada no exemplo do elevador, onde ocorre a queda livre, é possível observar matematicamente um ambiente de microgravidade. Este método é usado nas chamadas torres de queda livre. Estas torres propiciam ambiente de microgravidade em superfície terrestre durante alguns segundos. O Centro de Pesquisas Lewis da NASA possui duas torres, sendo que uma propicia ambiente de microgravidade por 5,2 segundos durante uma queda de 132 metros, e a outra propicia ambiente de 2,2 segundos em uma queda de 24 metros. O Centro De Vôos Espaciais Marshall da NASA possui uma torre de 100 metros, possibilitando 4,5 segundos de microgravidade durante a queda. No Japão, há uma mina vertical com 490

metros de profundidade convertida em uma torre de queda livre, criando ambiente de microgravidade por cerca de 10 segundos.

A microgravidade pode também ser obtida em vôos parabólicos de aeronaves e foguetes. No caso das aeronaves, pode-se conseguir períodos de cerca de 15 segundos de microgravidade. Um vôo típico dura entre duas a três horas, possibilitando cerca de 40 períodos de microgravidade. Para isto, a aeronave ascende rapidamente em uma inclinação de 45 graus, faz o trajeto de uma parábola, e descende em um ângulo de 45 graus. Durante os períodos de subida e descida, a tripulação e os experimentos são sujeitos a uma aceleração de cerca de duas vezes a aceleração gravitacional. Durante o vôo parabólico, a aceleração é da ordem de grandeza de 10^{-3} vezes a aceleração da gravidade na superfície terrestre. Nos foguetes, o processo de vôo é similar, gerando aceleração de 10^{-5} vezes a aceleração gravitacional na superfície terrestre por um período de cerca de 5 minutos. Uma situação semelhante ao ambiente de microgravidade criado por vôos parabólicos pode ser vivenciada em montanhas-russas, em partes do trajeto onde existam subidas seguidas por descidas, e ao dirigir em estradas onde existem sucessivas subidas e descidas.

O vôo parabólico e os valores aproximados da aceleração no interior da aeronave estão representados na Figura 8.

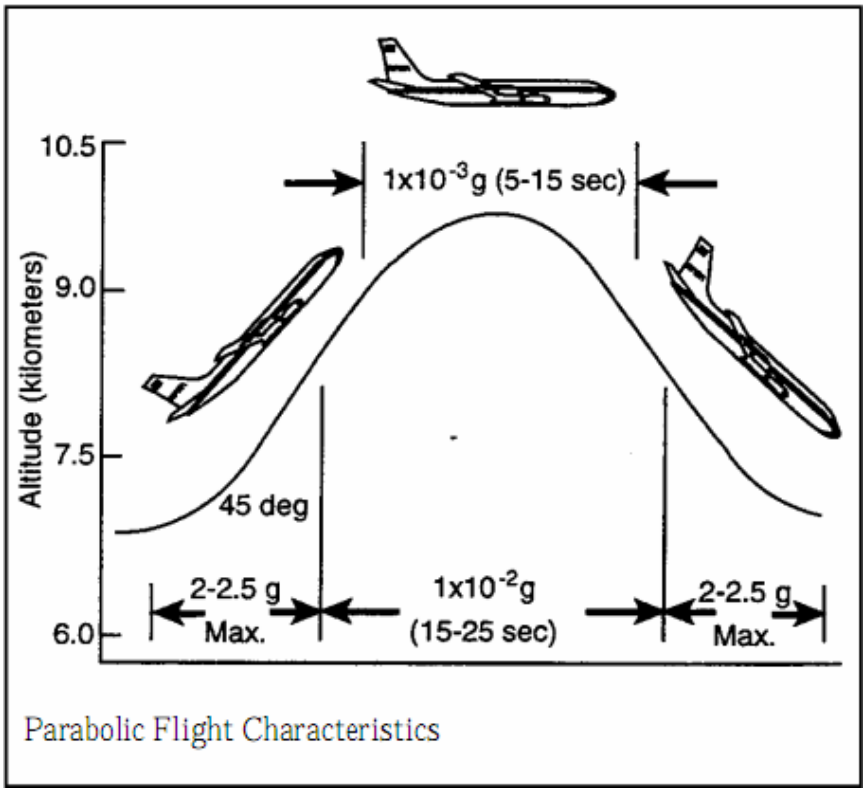

Figura 8: Vôo Parabólico de uma Aeronave.
Fonte: ROGERS; VOGT; WARGO, 1997.

Embora estes métodos propiciem microgravidade, a sua duração é limitada. Para conduzir investigações científicas mais demoradas, é necessário um outro tipo de queda livre, obtido através de vôos espaciais. Em seus *Principia*, Isaac Newton descreve como hipoteticamente um satélite artificial poderia orbitar em torno da Terra, através do seguinte exemplo: um canhão está no topo de uma montanha, alta o suficiente de modo a ultrapassar a atmosfera terrestre, eliminando o atrito com o ar. Este canhão atira bolas paralelas ao chão. Ao atirar, duas forças atuam em cada bola. A primeira força lança a bola para fora do canhão, devido à explosão da pólvora no seu interior. A outra força é a gravidade, causando uma curvatura no trajeto da bola e atraindo-a em direção ao chão, causando um movimento parabólico.

Ao usar certa quantidade de pólvora, a bola atinge certa distancia do canhão. Quando mais pólvora se utilizar, maior será esta distância. Ao aumentar a quantidade de pólvora, eventualmente a bola irá ser lançada com energia suficiente para circular a Terra e cair em seu ponto inicial. Desta maneira, a bola orbitou em torno da Terra. Se não houver a atuação de outra força senão a gravidade, a bola iria continuar a circular a Terra nesta órbita.

O exemplo de Newton é ilustrado na Figura 9.

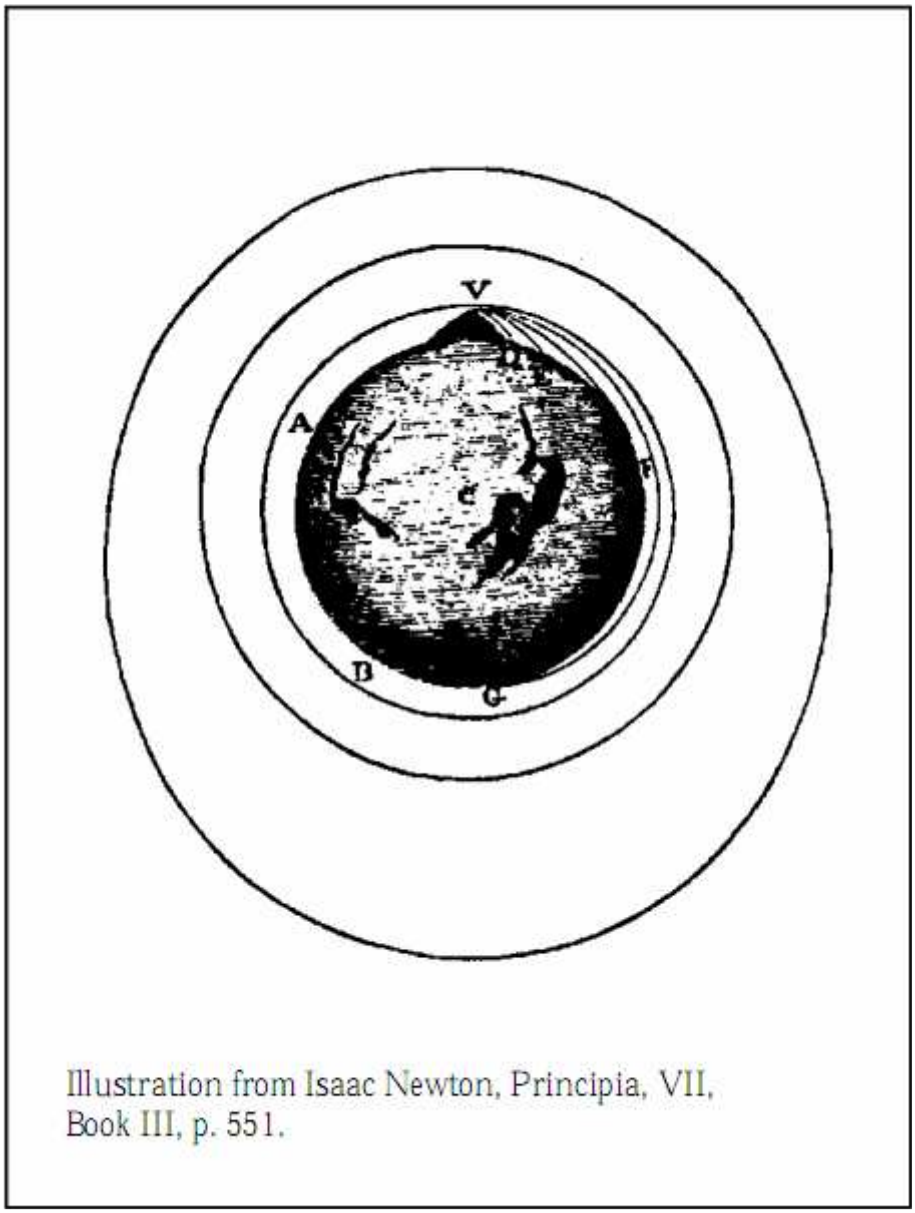

Figura 9: Ilustração do Exemplo de Newton.
Fonte: ROGERS; VOGT; WARGO, 1997.

Assim, pode-se concluir que, em altitude e velocidade corretas, uma aeronave em órbita terrestre executa um trajeto de queda livre em paralelo com a curvatura terrestre, gerando um ambiente de microgravidade de alta qualidade durante o tempo de órbita (ROGERS; VOGT; WARGO, 1997).

4 PROPOSTA EXPERIMENTAL

Neste trabalho, foram feitos três arranjos experimentais diferentes, baseados no conceito das torres de queda livre. O primeiro arranjo experimental investiga o comportamento da chama de uma vela em ambiente de microgravidade. O segundo investiga o comportamento de um líquido caindo em forma de filete. O terceiro é uma reprodução do experimento conhecido como Elevador de Einstein.

Para a melhor investigação do comportamento da chama de uma vela e do líquido caindo em forma de filete, foi utilizada uma câmera digital em modo de gravação de vídeo para registrar o experimento. O registro foi então transferido para um computador, onde foi editado, com finalidade de reduzir a velocidade de reprodução para 20% da velocidade original, para melhor observação dos resultados. O recurso de avanço quadro a quadro, presente em alguns softwares de reprodução de vídeo, também se mostra útil para a análise.

4.1 A CHAMA DE UMA VELA

Ao acender uma vela, observa-se que a chama adquire um formato alongado. Isto ocorre devido à propagação de calor ocorrida no processo de combustão.

O calor na chama da vela é propagado de três maneiras: por condução, devido ao contato do pavio aquecido com o corpo de cera da vela; por irradiação, através da luminosidade gerada pela chama; e por convecção, devido ao movimento do oxigênio presente ao redor da chama (ROGERS; VOGT; WARGO, 1997).

A Figura 10 representa a propagação de calor em uma vela.

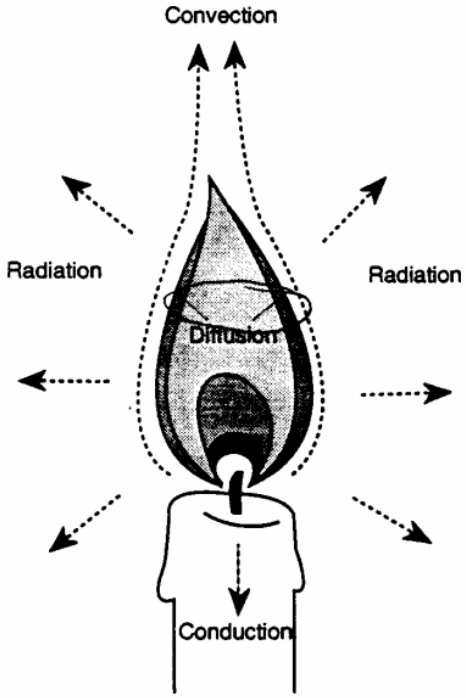

Figura 10: Propagação de calor na chama de uma vela.
Fonte: ROGERS; VOGT; WARGO, 1997.

Na convecção, a massa de oxigênio, juntamente com os produtos da combustão, é aquecida, ocupando um volume maior e consequentemente se tornando menos densa. Esta massa de oxigênio menos densa tende a ascender devido a forças de empuxo, ocupando o lugar das massas de oxigênio com temperatura menor e densidade maior, que descem e ficam mais próximas da chama. A massa de ar mais densa e de temperatura menor é então aquecida pela chama, se tornando menos densa e ascendendo. Este processo, que se repete enquanto o aquecimento é mantido, gera correntes de convecção, mantendo o oxigênio em circulação e resultando no formato da chama (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996).

Para a realização deste experimento, foi utilizado um arranjo experimental baseado no artigo publicado na Rev. Física na Escola, v. 1, n. 1, p. 15-17, 2000. O experimento original consiste em uma caixa em queda livre, onde uma câmera registra o comportamento de experimentos no interior da caixa durante a queda. Foram utilizados os seguintes materiais:

- caixa de papelão;
- câmera digital, com modo de gravação de vídeo;
- quatro elásticos do tipo utilizado para prender dinheiro;
- quatro clipes para papel;
- dois palitos de madeira para churrasco;

- pedaço de papelão de mesmas dimensões que o fundo da caixa;
- vela.

Os materiais aqui apresentados podem ser substituídos por outros materiais similares disponíveis.

A Figura 11 mostra o interior da caixa de papelão, com a vela acesa em sua base e a câmera fixa a uma de suas laterais.

Figura 11: Interior da caixa, com o experimento pronto para a realização.

Para a fixação da câmera no interior da caixa, foram utilizados dois elásticos e dois palitos de madeira para churrasco. Foram feitos quatro orifícios em uma das laterais da caixa, na posição desejada para a câmera. O espaçamento entre os orifícios deve ser ligeiramente maior que as dimensões da câmera. Em seguida, cada extremidade dos elásticos foi passada por um dos orifícios e presa aos palitos pela face externa da lateral da caixa. A câmera foi então colocada no interior da caixa, presa aos elásticos.

A Figura 12 mostra a câmera fixa à lateral da caixa, presa aos elásticos.

Figura 12: Câmera presa aos elásticos.

A Figura 13 mostra os elásticos presos aos palitos na face externa da lateral da caixa.

Figura 13: Elásticos presos aos palitos de madeira.

O pedaço de papelão foi utilizado como base para a vela. Os clipes foram utilizados para fixar a vela na base de papelão, e foram dobrados conforme mostra a Figura 14.

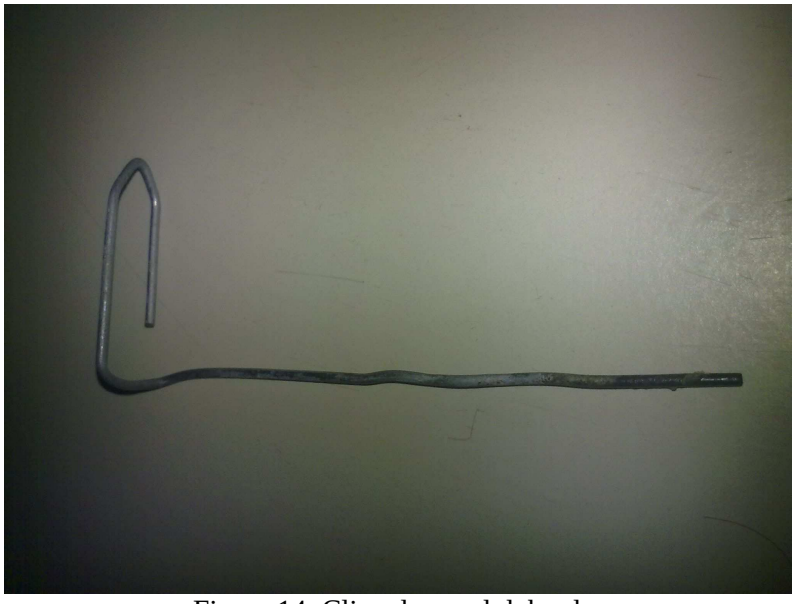

Figura 14: Clipe de papel dobrado.

Após dobrar os quatro clipes, foi desenhado no papelão um círculo de dimensão ligeiramente maior que o diâmetro da vela. A extremidade pontiaguda de cada clipe foi inserida em pontos deste círculo. A vela foi inserida entre as extremidades pontiagudas dos clipes, e presa a eles através dos dois elásticos. A Figura 15 ilustra o pedaço de papelão com o círculo de dimensão aproximada ao diâmetro da vela, e os quatro X indicam pontos onde os clipes devem ser inseridos.

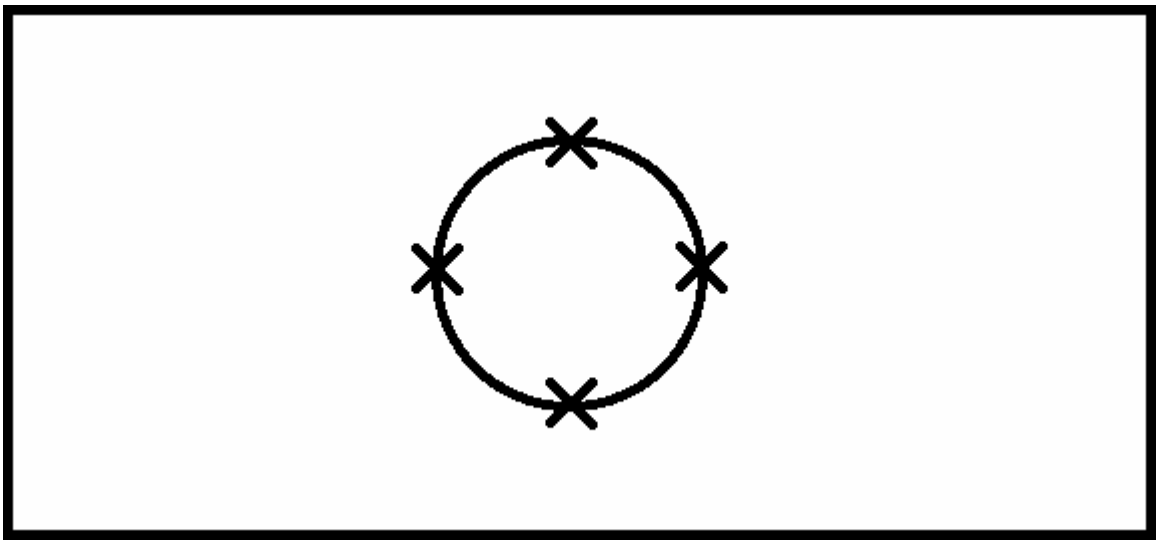

Figura 15: Pedaço de papelão a ser usado como base para a fixação da vela, com a indicação dos orifícios por onde são inseridos os clipes.

A Figura 16 mostra os clipes inseridos na parte inferior do pedaço de papelão.

Figura 16: Clipes para papel inseridos no pedaço de papelão.

A Figura 17 mostra a vela fixa à base de papelão, através dos clipes e elásticos.

Figura 17: Vela fixa à base de papelão.

Outras maneiras podem ser utilizadas para a montagem do experimento. Pode-se, por exemplo, utilizar uma base de madeira com um orifício de dimensão igual ao diâmetro da vela, onde a mesma é inserida.

Após a montagem, a vela foi inserida no interior da caixa. Os excessos do papelão utilizado como base foram cortados, gerando uma pequena fixação na base da caixa. Com a câmera registrando em vídeo a realização do experimento, a caixa foi então fechada, suspensa a aproximadamente um metro de altura, e solta em queda livre, tomando-se o cuidado de não imprimir movimento de rotação na mesma.

4.2 O FILETE DE UM LÍQUIDO

O filete de um líquido é uma das maneiras mais simples de se observar os efeitos da microgravidade. Um experimento de fácil execução pode ser realizado utilizando-se da água em queda livre.

Para este experimento, foram utilizados:

- copo plástico;

- balde ou bacia;
- líquido (colorido, para facilitar a visualização);
- câmera digital, com modo de gravação de vídeo
- pedaço de pano.

O experimento consiste em um copo de plástico, com um orifício em sua base. Este copo é então cheio com um líquido, que cai em forma de filete através do orifício. Um balde ou bacia é utilizado para coletar o líquido, conforme mostra a Figura 18.

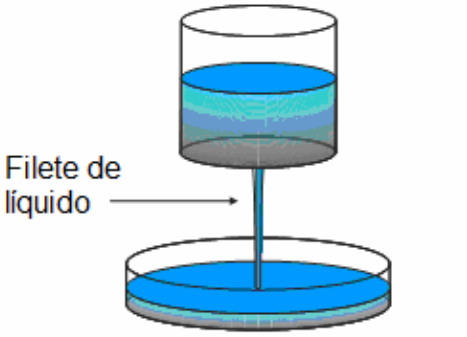

Figura 18: Líquido escoando pelo orifício na base do copo, e caindo em outro recipiente.
Fonte: PAULA; SABA; SILVA, 2000, adaptação do autor.

O copo é então solto em queda livre, e segurado novamente em plena queda, enquanto a câmera registra o experimento em vídeo. Este experimento pode ser realizado por uma pessoa, utilizando um apoio para a câmera ou segurando-a com uma das mãos enquanto utiliza a outra para realizar o experimento, ou por duas pessoas, onde uma realiza o experimento e a outra faz o registro em vídeo.

Durante a execução do experimento, o líquido pode respingar para fora do balde ou bacia, caso o não se consiga segurar o copo durante a sua queda e este caia no interior da bacia. Portanto, é importante ter em mãos um pano ou esfregão, para enxugar o líquido. Para a melhor observação do filete, o líquido utilizado foi refrigerante de cola, devido à sua coloração, porém outros líquidos diferentes podem ser utilizados.

Um segundo experimento pode ser realizado, utilizando-se o mesmo arranjo experimental anterior. O copo é elevado à altura de alguns metros e cheio de água ou outro líquido. Enquanto o copo permanece suspenso, o líquido é liberado pelo orifício, formando o filete. Observa-se a olho nu o líquido em queda livre, conforme ele vai se distanciando do orifício. Para este experimento, são necessárias duas pessoas, uma para elevar o copo e outra para fazer a observação do líquido.

4.3 O PRESENTE DE ANIVERSÁRIO DE EINSTEIN

O Presente de Aniversário de Einstein, também chamado de Elevador de Einstein, foi um brinquedo desenvolvido pelo físico Eric Rogers, para demonstrar o Princípio da Equivalência. Rogers, professor em Princeton na década de 50 e colega de Einstein, o presenteava ocasionalmente com brinquedos envolvendo princípios físicos.

No aniversário de 76 anos de Einstein, Rogers o presenteou com o seguinte brinquedo: uma haste longa e oca, com um globo transparente na extremidade superior. No interior do globo, havia uma esfera de metal e um copo. A esfera, inicialmente fora do copo, era amarrada a um fio, que passava por dentro do copo e atravessava a haste oca até a extremidade inferior, onde o fio era preso a uma mola, já esticada, porém sem tensão suficiente para puxar a esfera para dentro do copo. Esta mola era presa a um pesinho em formato de bastão, fixo à extremidade inferior da haste. O brinquedo completo é representado na Figura 19.

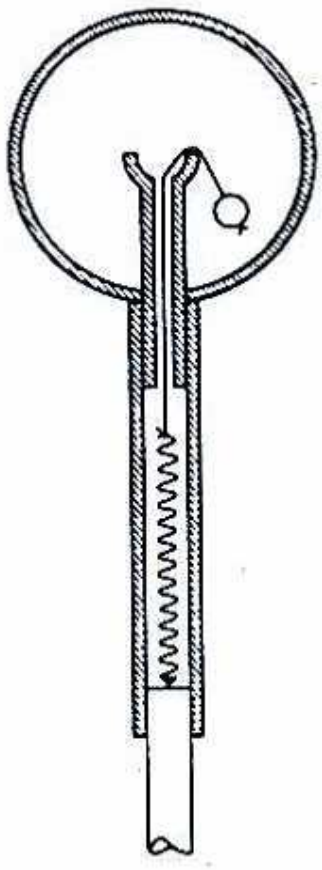

Figura 19: O Presente de Aniversário de Einstein.
Fonte: ROGERS; COHEN, 1994.

O objetivo deste brinquedo é encontrar uma maneira infalível de colocar a bola dentro do copo. Algumas regras e informações são fornecidas:

- o globo transparente não pode ser aberto;
- a esfera é feita de bronze sólido;
- a mola está esticada, mesmo quando a esfera está no interior do copo, porém a tensão da mola não é suficiente para puxar a esfera para dentro do copo;
- a haste é bastante longa;
- existe um método infalível para colocar a esfera no interior do copo, desconsiderando ocasionais acertos obtidos ao agitar aleatoriamente o brinquedo.

Segundo Rogers, Einstein adorou o brinquedo, e resolveu o problema apresentado imediatamente (ROGERS; COHEN, 1994).

Duas semanas antes de Einstein morrer, ele se encontrou com Cohen, onde os dois conversaram sobre história da ciência e grandes físicos do passado. Ao terminar a conversa, Einstein disse para Cohen esperar e mostrou seu presente de aniversário. Após descrever o brinquedo, com um sorriso no rosto, Einstein elevou-o à altura do teto e o soltou em queda livre. Quando a base da haste do brinquedo atingiu o chão, o globo transparente estava ao nível dos olhos de Cohen, com a esfera no interior do copo, cumprindo assim o objetivo do brinquedo (COHEN, 1955).

Para a confecção do experimento, vários materiais diferentes podem ser utilizados. Neste trabalho, foram utilizados:

- cabo de vassoura;
- prego;
- porca para parafuso ou arruela, com orifício de dimensão aproximada ao diâmetro do prego;
- elástico do tipo utilizado para prender dinheiro;
- pote plástico;
- bola de gude;
- clipe para papel;
- cola tipo epóxi.

Para uma construção simplificada, foi dispensado o globo transparente e o peso em formato de bastão, além de utilizar um cabo maciço como haste, ao invés de utilizar uma haste oca. Esta alteração influencia no comprimento do elástico utilizado. O recipiente utilizado para receber a bola foi um pote plástico do tipo utilizado para armazenar remédios em cápsula.

Os itens mais críticos para o experimento são o elástico e a bola. Estes dois materiais devem ser escolhidos em conjunto, pois o peso da bola deve ser maior que a força elástica exercida pelo elástico. Ou seja, ao suspender a bola fixa ao elástico, a bola deve ter peso suficiente para esticar o elástico. Utilizou-se uma bola de gude de dimensão ligeiramente menor que a abertura no pote, e um elástico do tipo utilizado para prender dinheiro. Outros objetos podem ser utilizados, desde que sejam menores que a abertura no pote, e possuam massa suficiente para esticar o elástico.

O comprimento do elástico varia de acordo com os materiais utilizados. No caso de se usar uma haste maciça, como no experimento montado para este trabalho, o comprimento do elástico deve ser ligeiramente menor que o recipiente utilizado para receber a bola. Para uma haste oca, o elástico deve ser menor que a haste e o recipiente somados. Para facilitar a montagem, o elástico foi cortado ao comprimento correto somente após ser fixado à bola.

A porca para parafuso foi colocada no prego, para melhor fixação do elástico. Em seguida, o elástico foi amarrado ao prego, conforme mostra a Figura 20.

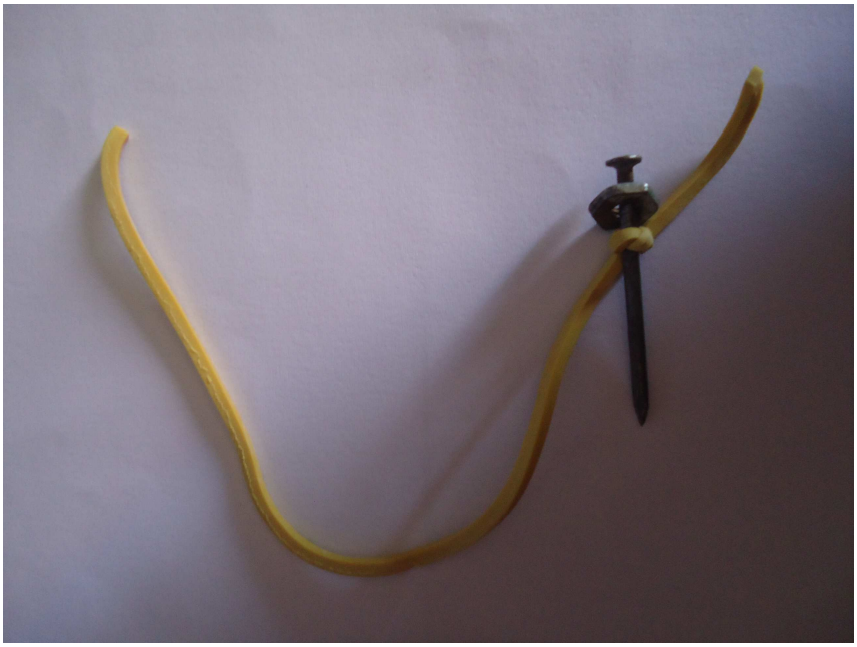

Figura 20: Elástico preso ao prego e a porca.

Utilizando este mesmo prego, o pote plástico foi fixado a uma das extremidades do cabo de vassoura, sem remover o elástico, como mostra a Figura 21. Desta forma, o elástico foi fixado ao fundo do pote, ao mesmo tempo em que o pote foi fixado ao cabo de vassoura.

Figura 21: Pote fixo ao cabo de vassoura através do prego.

O clipe para papel foi cortado e dobrado como ilustra a Figura 22, e fixado à bola de gude utilizando a cola do tipo epóxi, como mostra a Figura 23. Após a secagem da cola, a outra extremidade do elástico foi amarrada ao clipe.

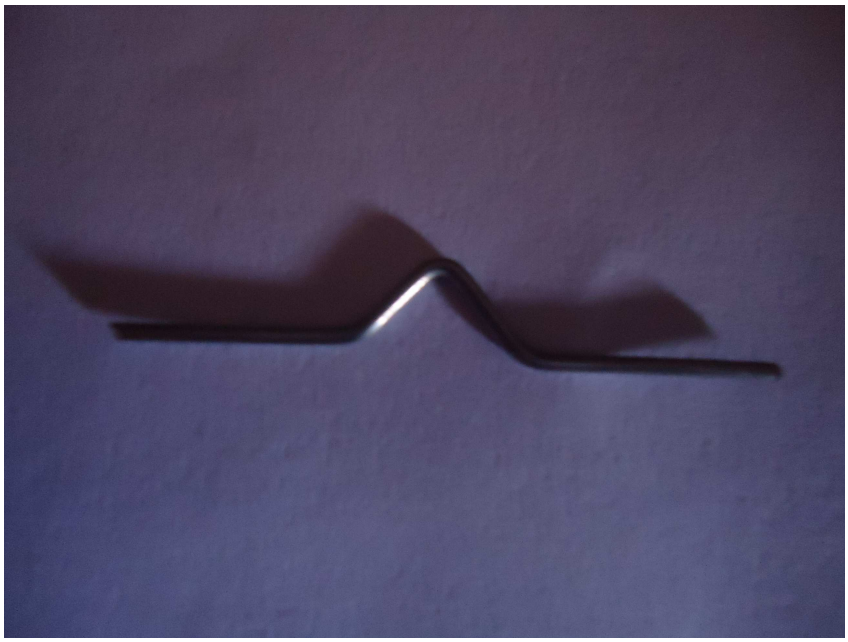

Figura 22: Clipe de papel cortado e dobrado.

Figura 23: Bola de gude com o clipe fixo através da cola do tipo epóxi.

A montagem completa é mostrada na Figura 24.

Figura 24: Elevador de Einstein adaptado.

O diagrama das forças atuantes no Elevador de Einstein pode ser visto na Figura 25.

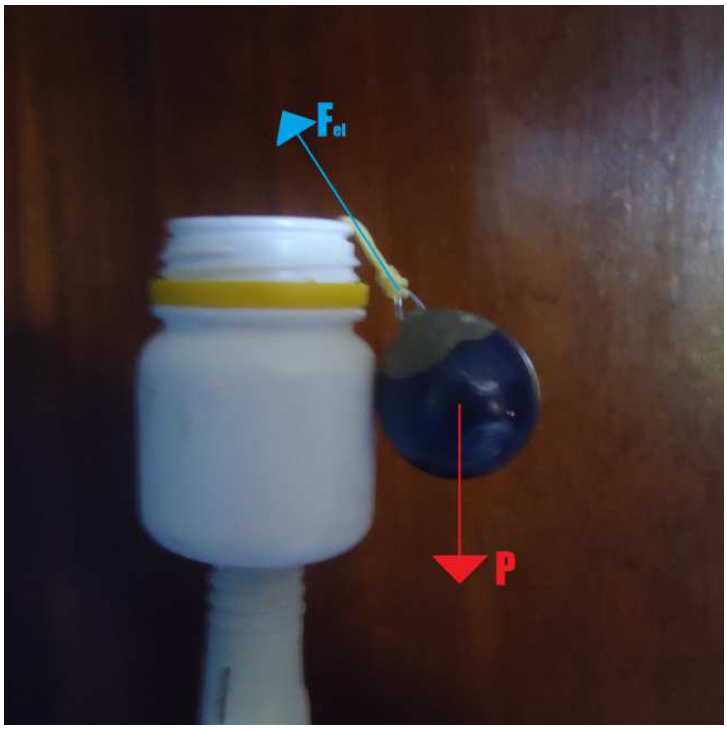

Figura 25: Diagrama de forças atuantes no Elevador de Einstein.

A realização deste experimento é bem simples. O cabo de vassoura é segurado com uma das mãos, que eleva o equipamento até a altura do teto. Em seguida, ele é solto e, após um tempo de queda e antes de o cabo atingir o chão, é segurado com as mãos.

Após a realização contínua do experimento, o elástico pode sofrer deformação permanente, sendo necessário trocá-lo por um novo para que o experimento torne a funcionar.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 A CHAMA DE UMA VELA

Durante a queda, observa-se uma mudança no formato da chama da vela, que passa a ser esférico. Isto ocorre devido à diminuição das correntes de convecção. A chama passa a propagar calor apenas por condução e irradiação, e adquire um formato esférico devido à radiação se propagar igualmente em todas as direções, como mostra a Figura 26.

Figura 26: Chama de uma vela, antes da queda (esquerda) e durante a queda (direita).

Nota-se também uma diminuição da intensidade da chama em microgravidade. Devido à ausência da convecção, os produtos resultantes da queima, ao invés de ascenderem, acumulam-se ao redor da chama, impedindo o afluxo de mais comburente e combustível (GALEMBECK, 1988).

Após um breve período, a chama retorna ao formato original, devido à diminuição do ambiente de microgravidade. Em seguida, a chama se apaga, devido ao impacto da caixa com o solo.

`

5.2 O FILETE DE UM LÍQUIDO

No experimento, observa-se que, durante a queda, o filete que escoa do copo cessa e, ao segurar o copo novamente em plena queda, o filete torna a escoar. Antes da queda, uma força de mesma intensidade e direção, e sentido oposto à força de atração gravitacional é exercida no copo pelo realizador do experimento, de modo a suspendê-lo no ar. No líquido, porém, a única força atuante é a força de atração gravitacional, forçando-o a escoar pelo orifício.

Durante a queda, a força aplicada para suspender o copo é cessada, e o copo e o líquido entram temporariamente em microgravidade. Sem a influência de forças externas, as forças atuantes no sistema são os pesos do copo e do líquido. Em microgravidade, ambos os pesos tendem a zero, e a água cai juntamente com o copo, cessando o escoamento do filete através do orifício. Ao segurar o copo em plena queda, retorna-se à situação inicial do experimento, e o filete volta a se formar. A Figura 27 mostra três momentos da realização do experimento.

Figura 27: O filete de um líquido com o copo suspenso (esquerda); copo e líquido em queda livre (centro); segurando o copo em plena queda (direita).

Este experimento pode ser considerado como uma variação do Elevador de Einstein, ilustrando o Princípio da Equivalência (MEDEIROS; MEDEIROS, 2005).

No experimento seguinte, o foco é o filete e o seu formato. A tensão superficial atua no líquido, que tende a assumir formato esférico. Estando o líquido em repouso, a força gravitacional supera a tensão superficial. Próximo ao orifício, a tensão superficial e a força gravitacional são responsáveis pelo formato do filete. Ao se afastar do orifício, o líquido entra

em microgravidade e assume formato aproximadamente esférico, devido à redução da força gravitacional e atuação da tensão superficial (ROGERS; VOGT; WARGO, 1997).

Antigamente, esferas de chumbo para caça eram feitas ao derramar gotas de chumbo derretido de uma altura de alguns metros. Durante a queda, o chumbo, ao mesmo tempo em que se resfriava, assumia forma esférica devido à tensão superficial (PAULA; SABA; SILVA, 2000).

Este experimento deve ser observado a olho nu, devido a dificuldades encontradas por parte da câmera em registrar as gotas de água em queda livre.

5.3 O PRESENTE DE ANIVERSÁRIO DE EINSTEIN

Durante a queda, percebe-se que a bola entra no pote. Antes de analisar o que acontece durante a queda, deve-se analisar o experimento.

Através da análise das forças no experimento, nota-se que a força peso da bola atua sobre o elástico, esticando-o. O elástico então exerce uma força elástica F_{el}, forçando-o a retornar ao seu comprimento natural. Como o elástico não possui tensão suficiente para puxar a bola para o interior do pote, conclui-se que a força peso da bola é igual em módulo à projeção da força elástica F_{el} no eixo y. O diagrama de forças atuantes no elástico antes da queda é mostrado na Figura 28.

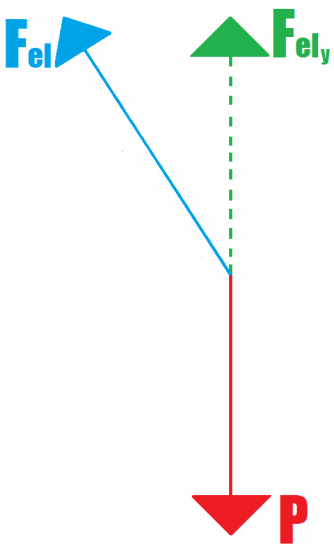

Figura 28: Diagrama de forças atuantes, antes da queda.

Durante a queda, o experimento se sujeita a um ambiente de microgravidade. Com a gravidade em relação à Terra reduzida, a força peso da bola se reduz, tornando-se momentaneamente menor que a força elástica F_{el} exercida pelo elástico, como mostra a Figura 28.

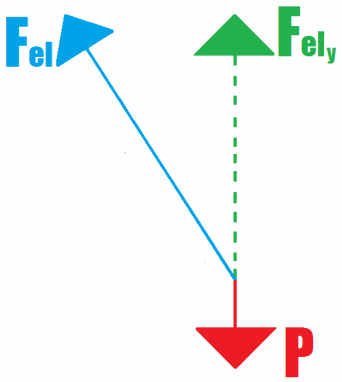

Figura 29: Diagrama de forças atuantes, durante a queda.

Assim a força exercida pelo elástico é suficiente para puxar a bola para dentro do pote durante a queda.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto o estudo do fenômeno conhecido como microgravidade. Mesmo não estando explicitamente presente na maioria dos planos de estudo do curso de Física, o tema pode ser estudado como um caso particular da força gravitacional, presente nos planos de estudo. Devido ao fato de estar presente nos filmes sobre viagens espaciais, o tema desperta curiosidade nos alunos, por se tratar de um fenômeno mais atual e não estar diretamente presente em seus cotidianos. Com o estudo da microgravidade, os alunos podem compreender o que acontece durante estas viagens espaciais, como este fenômeno é criado, e sua importância para a ciência.

Após uma breve revisão teórica a respeito da atração gravitacional, o tema microgravidade foi estudado de forma teórica, para então ser analisado experimentalmente. Os experimentos apresentados foram construídos com materiais de baixo custo e de fácil aquisição, sendo adaptáveis caso houver a indisponibilidade de algum material utilizado para este trabalho.

Durante a realização dos experimentos, verificou-se que eles, apesar de aparentemente simples, são fadados ao erro caso não haja um bom planejamento e montagem. Assim como em outras práticas experimentais, foi necessário analisar os experimentos, escolher os materiais, adaptá-los de acordo com os materiais escolhidos visando facilitar suas execuções, testá-lo, e remontá-los caso não houvesse sucesso na realização.

Os experimentos aqui apresentados são adequados ao uso em sala de aula, por serem mais simples, em comparação a outros experimentos, e por apresentarem resultados facilmente observáveis. Em termos de montagem, o Elevador de Einstein se mostra mais difícil que os outros dois, porém de realização mais fácil, além de não necessitar do registro em vídeo para a melhor observação do resultado. O experimento da água possui a montagem mais fácil, porém necessita certa habilidade para a sua realização.

O experimento da vela possui montagem relativamente simples, porém exige mais materiais e recursos do que os outros. Diferente dos anteriores, este é realizado no interior de uma caixa de papelão, sendo necessário o registro em vídeo para a observação do experimento. O resultado obtido é interessante, porém é mais bem observado em câmera lenta, sendo sugerido ao professor realizá-lo fora da sala de aula, mostrá-lo aos alunos, explicar como foi montado e realizado, e mostrar o vídeo com o resultado obtido. Sua explicação deve ser bem planejada caso seja realizado durante o estudo da força gravitacional,

devido ao fato de que o aluno só estudará propagação de calor na série seguinte. Portando, o professor deverá planejar a explicação de modo a não exigir conhecimento prévio a respeito de propagação de calor.

Do mesmo modo, a força elástica presente no Elevador de Einstein só será estudada pelo aluno após o estudo da força gravitacional. Cabe ao professor decidir se a realização dos experimentos deve ser feita durante o estudo da força gravitacional, ou durante o estudo dos respectivos temas envolvidos no experimento da vela e no Elevador.

Outras propostas de experimentos podem ser encontradas nos materiais utilizados como referência para este trabalho, entretanto, nem todas as sugestões de experimentos são viáveis para a utilização em sala de aula, por exigirem materiais específicos, ou por não apresentarem resultado facilmente observável. A falta de imagens descritivas e melhor explicação textual dificultaram a escolha e realização dos experimentos, pois, em alguns casos, imaginou-se certo resultado ao ler a descrição do experimento e, ao realizá-lo, encontrou-se um resultado de difícil observação, sendo pouco apropriado para o estudo em sala de aula.

A realização de experimentos pode se tornar uma prática mais comum dentro da sala de aula. Com o experimento, o aluno pode visualizar melhor e interagir com o fenômeno estudado, testando diversas possibilidades e despertando ainda mais a curiosidade e interesse do aluno. A escolha dos experimentos e materiais utilizados mostra que, mesmo sem dispor de muitos recursos, é possível realizá-los em casa e na sala de aula.

7 REFERÊNCIAS

COHEN, B. **An Interview with Einstein**. Scientific American, v. 193, n. 1, p. 68-73, 1955. Disponível em <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/OTHE00009>. Acesso em 13 abr. 2011.

GALEMBECK, F. **Uma Chama Para o Espaço**. Ciência Hoje, v. 8, n. 43, p. 11, 1988.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4 ed. v 1. São Paulo: LTC, 1996. 356 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4 ed. v 2. São Paulo: LTC, 1996. 310 p.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. de. **Einstein, a Física dos Brinquedos e o Princípio da Equivalência**. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 22, n. 3, p. 299-315, 2005. Disponível em <http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6373/5899>. Acesso em 13 abr. 2011.

NASA. **What Is Microgravity?** Disponível em <http://www.nasa.gov/audience/foreducators/topnav/materials/listbytype/What_Is_Microgravity.html> . Acesso em 04 mar. 2011.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 4 ed. v 1. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 328 p.

PAULA, R. J. de; SABA, M. M. F.; SILVA, B. B. **Microgravidade na Sala de Aula**. Rev. Física na Escola, v. 1, n. 1, p. 15-17, 2000. Disponível em <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol1/Num1/artigo5.pdf>. Acesso em 27 fev. 2011.

ROGERS, E.; COHEN, B. The Equivalence Principle Demonstrated. In: JENNISON, B.; OGBORN, J. **Wonder & Delight: Essays in Science Education in Honour of the Life and Work of Eric Rogers 1902-1990**. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1994. p. 233-235.

ROGERS, M. J. B.; VOGT, G. L.; WARGO, M. J. **Microgravity: A Teacher's Guide with Activities in Science, Mathematics, and Technology**. National Aeronautics Space Administration, 1997. Disponível em <www.nasa.gov/pdf/62474main_Microgravity_Teachers_Guide.pdf>. Acesso em 28 fev. 2011.