



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

**UTILIZAÇÃO DE FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS DIGITAIS PARA O  
ESTUDO DA QUEDA DOS CORPOS**

Marco Adriano Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadores: Helio Salim de Amorim  
Susana de Souza Barros

Rio de Janeiro  
Maio de 2011

# UTILIZAÇÃO DE FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS DIGITAIS PARA O ESTUDO DA QUEDA DOS CORPOS

Marco Adriano Dias

Helio Salim de Amorim  
Susana de Souza Barros

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

\_\_\_\_\_  
Presidente, Prof. Helio Salim de Amorim

\_\_\_\_\_  
Prof. Ricardo Barthem

\_\_\_\_\_  
Prof. Marcelo Shoey

Rio de Janeiro  
Maio de 2011

## FICHA CATALOGRÁFICA

D541 Dias, Marco Adriano

Utilização de fotografias estroboscópicas digitais para o estudo da queda dos corpos / Marco Adriano Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2011.

ix, 92f.: il.;30cm.

Orientadores: Helio Salim de Amorim e Susana de Souza Barros

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto de Física / Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, 2011.

Referências Bibliográficas: f. 89-91.

1. Ensino de Física. 2. Queda dos corpos. 3. Fotografia Estroboscópica Digital.  
I. Amorim, Helio Salim de; Barros, Susana de Souza. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-graduação em ensino de Física.  
III. Utilização de Fotografias Estroboscópicas Digitais para o estudo da queda dos corpos.

*Ao meu filho Gabriel e minha esposa  
Gabriela que sempre serão uma luz em meu  
caminho.*

*É só de ninar e desejar que a luz do nosso  
amor, matéria prima desta canção, fique a  
brilhar  
E é pra você e pra todo mundo que quer trazer  
assim a paz no coração  
Meu pequeno amor  
E de você me lembrar toda vez que a vida  
mandar olhar pro céu estrela da manhã  
Meu pequeno grande amor que é você Gabriel  
Pra poder ser livre como a gente quis quero te  
ver feliz*

*Beto Guedes*

## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer por eu e minha família termos tido saúde, paz e harmonia durante essa jornada. Agradecer também por eu ter tido vontade, oportunidade, equilíbrio e suporte familiar para encarar essa jornada. Foram muitos momentos de superação e sem a presença divina em nossas vidas eu não teria chegado até aqui.

Agradecer à prof. Susana de Souza Barros e ao prof. Helio Salim pelas preciosas e longas horas de aprendizado. Por terem me dado oportunidade de juntar duas paixões, a fotografia e o ensino de Física, tornando mais prazeroso o meu trabalho; agradeço pelas prontas respostas, pela cultura e conhecimentos que espontaneamente me transmitiram em todos os nossos encontros. Também agradeço pela dedicação total e pela paciência dedicada. Por fim tudo isso se constituiu num aprendizado de vida que em nenhuma outra oportunidade eu teria;

Ao professor Fernando Souza Barros pelos ensinamentos sobre a Física do movimento em meio viscoso, que em muito contribuíram para minha formação e para a realização deste trabalho;

Aos meus professores Deise Viana, Marta Barroso, Marcus Venicius, Alexandre Tort, Penha Maria, Ricardo Barthem e Carlos Eduardo pela formação acadêmica de excelente qualidade que me proporcionaram.

Aos meus colegas de turma da *velha guarda* Walter da Silva Santos, Otávio Ferreira, Sergio Tobias, Jorge Gomes e Bernardo Menescal pelos exemplos, histórias e por toda experiência passada durante nossa convivência.

Aos meus colegas de turma da *jovem guarda* Anderson Ribeiro, Alexsander Paixão, Geraldo Felipe, Marta Máximo, Leandro Néri e Marcelo São Tiago pelo companheirismo e troca de conhecimentos durante o curso.

Ao meu primo Renan Salaberga por ter sido um grande motivador para a realização das difíceis experiências de queda no ar.

Aos profissionais da marcenaria do IF que confeccionaram o lançador de esferas para a proveta para que fossem realizadas as fotografias de queda em meio líquido.

## RESUMO

### UTILIZAÇÃO DE FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS DIGITAIS PARA ESTUDAR A QUEDA DOS CORPOS

Marco Adriano Dias

Orientadores:

Helio Salim de Amorim

Susana de Souza Barros

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós- Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

De uma forma geral a situação do ensino de Física é paradoxal: se trata de uma ciência experimental que, na maioria dos casos, é ensinada com uma formulação exclusivamente teórica. Por isso neste trabalho analisamos os motivos que contribuem para que a Física seja ensinada dessa forma e apresentamos uma opção que pode contribuir para mudar esse quadro, que é a utilização de *fotografias estroboscópicas digitais* no estudo da mecânica. A utilização dessas fotografias permite ao professor superar as barreiras que dificultam a implementação das atividades experimentais e, com isso, possibilitam a concomitância entre a teoria e a prática no ensino de mecânica. É apresentado como exemplo o estudo da queda de esferas em diferentes meios viscosos, inclusive o ar.

Palavras-chave: ensino de Física, Mecânica, queda livre, queda em meio viscoso, atividades experimentais e fotografia estroboscópica.

Rio de Janeiro

Maio de 2011

## **ABSTRACT**

### USE OF DIGITAL STROBOSCOPIC PHOTOGRAPHS TO STUDY FALLING BODIES

Marco Adriano Dias

Supervisors:

Helio Salim de Amorim

Susana de Souza Barros

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

In general the situation of physics teaching is paradoxical: it is an experimental science that, in most cases, is taught with a theoretical formulation exclusively. So in this paper we discuss the reasons that contribute to physics is taught in this way and present an option that can help change this picture, which is the use of digital stroboscopic photography in the study of mechanics. The use of these photographs allows the teacher to overcome the barriers that hinder the implementation of experimental activities and thereby allow the coexistence between theory and practice in teaching mechanics. It is presented as an example the study of falling spheres in different viscous media, even the air.

Keywords: physics education, mechanics, free fall, fall in the viscous medium, experimental activities and stroboscopic photography

Rio de Janeiro

May, 2011

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>A PROBLEMÁTICA DO ENSINO DE FÍSICA .....</b>	<b>4</b>
2.1.	Um panorama atual do ensino de Física.....	4
2.2.	Breve histórico das ações para a melhoria do ensino de Física no Brasil.....	5
2.3.	A persistência do ensino tradicional.....	7
2.3.1.	O baixo número de professores com formação específica.....	7
2.3.2.	Deficiências de cultura experimental no Brasil.....	8
2.3.3.	A persistência do ensino tradicional.....	8
2.3.4.	As dificuldades impostas pelas condições de trabalho.....	9
2.4.	Problemática atual.....	10
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>O ENSINO EXPERIMENTAL NA EDUCAÇÃO BÁSICA.....</b>	<b>11</b>
3.1.	As orientações para o ensino de Ciências no Brasil: A LDB e os PCNs.....	11
3.2.	O enfoque dos experimentos clássicos.....	13
3.3.	O enfoque de demonstração de fenômenos físicos.....	13
3.4.	O enfoque de atividades de investigação.....	14
3.5.	Discussão.....	16
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>UMA ABORDAGEM DA QUEDA DOS GRAVES NA EDUCAÇÃO BÁSICA.....</b>	<b>18</b>
4.1.	Abordagem nos livros didáticos.....	19
4.1.1.	Discussão da análise nos livros didáticos.....	20
4.2.	Um breve histórico do estudo da queda dos corpos.....	21
4.2.1.	A queda dos corpos segundo Aristóteles.....	22
4.2.2.	A queda dos corpos para Galileu.....	24
4.2.3.	Discussão sobre a queda dos corpos para Aristóteles e para Galileu.....	26
4.3.	A dinâmica de corpos em queda.....	27
4.3.1.	Corpos em queda livre.....	27
4.3.2.	Corpos em queda com resistência do meio.....	29
4.4.	Simulação de queda livre e da queda em meio viscoso.....	31
4.4.1.	Simulação de queda livre sem resistência do meio.....	32
4.4.2.	Simulação de queda com resistência do meio.....	33
4.5.	A lei de Stokes e a determinação da constante $k$ .....	34
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>ESTUDO DA QUEDA DOS CORPOS: PROPOSTA DE ATIVIDADES.....</b>	<b>36</b>
5.1.	Programação da experiência de queda no ar.....	37



5.1.1. Preparação da experiência.....	37
5.1.2. Produção das fotografias estroboscópicas digitais.....	39
5.1.3. Análise das fotografias estroboscópicas.....	40
5.2. Análise da queda no ar das esferas de mesma massa e diâmetro diferente....	41
5.2.1. Resultados da queda de esferas de mesma massa e diâmetros diferentes em queda no ar.....	48
5.3. Análise da queda no ar de esferas de mesmo diâmetro e massa diferente.....	49
5.3.1. Resultados obtidos para as esferas de mesmo diâmetro e massas diferentes em queda no ar.....	55
5.4. A influência da viscosidade do meio na velocidade limite de esferas em queda.....	56
5.5. Experiência da queda de uma pequena esfera de aço em três meios diferentes.....	59
5.5.1. Discussão dos resultados obtidos com esferas de aço caindo através de meios com diferentes viscosidades.....	64
5.6. Considerações finais.....	64
<b>APÊNDICE 1 FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS DIGITAIS DE ESFERAS DE MESMA MASSA E DIÂMETROS DIFERENTES EM QUEDA NO AR.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE 2 FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS DIGITAIS DE ESFERAS DE MESMO DIÂMETRO E MASSAS DIFERENTES EM QUEDA NO AR.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE 3 FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS DIGITAIS DE ESFERAS DE AÇO EM QUEDA ATRAVÉS DE DIFERENTES MEIOS LÍQUIDOS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO PRODUÇÃO DE FOTOGRAFIAS ESTROBOSCÓPICAS SEM LÂMPADA ESTROBOSCÓPICA.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Desde a metade do século passado vem sendo reconhecido o potencial das atividades de laboratório como facilitadoras da aprendizagem de conceitos científicos e do desenvolvimento de competências nos alunos. Projetos pioneiros e de alta relevância para o ensino de Física, como o PSSC (1967), desde a década de 1960, deram destaque às atividades práticas em seus currículos.

O tempo passou e as atividades de laboratório mantiveram seu papel importante no aprendizado de conceitos físicos. Porém, no final da década de 1970 e início dos anos 80, os educadores em ciências começaram a questionar seriamente o papel do laboratório no ensino, pois as pesquisas indicavam que sua eficiência não era tão evidente. Foi uma época de mudança de paradigma, quando o ensino adquiria caráter formativo. Conforme destacaram Hofstein e Lunetta (2003) [...] *a importância de repensar o papel e a prática do trabalho de laboratório no ensino de ciências [...] é especialmente adequada porque nas últimas décadas temos aprendido muito sobre a cognição humana e a aprendizagem.* (HOFSTEIN E LUNETTA, 2003).

Atualmente esse papel é entendido como um conjunto de atividades que contribuem para que o aluno possa construir conceitos físicos a partir de investigações que permitem compreender os fenômenos. A designação investigação é aqui utilizada com o significado dos Padrões Nacionais de Ensino de Ciências nos Estados Unidos da América (NRC, 1996):

*(...) fazer observações; fazer perguntas; examinar livros e outras fontes de informação para ver o que já é conhecido; planejar investigações, revendo o que já é conhecido na luz da evidência experimental, utilizando ferramentas para coletar, analisar e interpretar os dados; propor respostas, explicações e previsões; e comunicar os resultados. Investigar exige a identificação dos pressupostos, o uso de críticas e raciocínio lógico, e consideração de explicações alternativas.* (NRC, 1996)

No Brasil, as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 1999) apresentam um conjunto de

competências e habilidades a ser desenvolvidas através do ensino de Física. Para isso a experimentação deverá estar presente ao longo de todo o Ensino Médio:

*É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável. (BRASIL, 1999)*

Como se pode inferir do exposto nos parágrafos anteriores, existe uma necessidade de se desenvolver um ensino de Física que conjugue teoria e prática. Mas não é dessa forma que se desenvolvem as aulas de Física. Ainda hoje, na maioria das escolas há um distanciamento entre teoria e prática. Por isso neste trabalho apresentamos uma proposta que tem por objetivo contribuir para que o ensino de Física possa ser concomitante entre a teoria e a prática, que é a utilização de Fotografias Estroboscópicas Digitais (doravante FED) para o estudo de movimentos reais.

Apresentamos essa técnica porque acreditamos que através dela podemos contribuir para suplantarmos os problemas enfrentados por aqueles professores que querem desenvolver uma aula mais experimental, mas que enfrentam diversas dificuldades para isso. Trata-se de uma técnica barata, que dispensa o espaço formal do laboratório, que economiza tempo e está disponível para quem quiser utilizá-la. Para tal iniciaremos nosso trabalho analisando os fatores que contribuem para que o ensino de Física esteja ainda nos dias de hoje distanciado das atividades práticas, mesmo com o reconhecimento da importância do seu papel há pelo menos seis décadas (Capítulo 2). Em seguida faremos uma explanação sobre o papel que as atividades de laboratório devem ter na educação básica e sobre os tipos de enfoque mais comuns (Capítulo 3).

As FEDs são uma ferramenta poderosa para suplantarmos as dificuldades discutidas no Capítulo 2 para desenvolver um ensino em concordância com as orientações para o ensino de Física discutidas no Capítulo 3. Para exemplificar isso propomos como exemplo a utilização dessas fotografias para estudar o movimento real de queda de corpos na vizinhança da Terra. Organizamos a nossa proposta em dois capítulos:

- No Capítulo 4 fazemos uma breve discussão sobre o histórico do estudo da queda dos corpos centrado nos trabalhos de Aristóteles e de Galileu, para em seguida apresentar a dinâmica dos corpos em queda em situações ideais, a queda livre, e também em situações onde há interação com o meio, a queda viscosa; e
- No Capítulo 5 apresentamos as FEDs de uma experiência de queda de esferas no ar e em outros meios fluidos (água, óleo e glicerina). Apresentamos também a análise dos dados dessas fotografias e a determinação das velocidades limites alcançadas. Dessa forma mostramos como se pode construir um modelo simplificado que relaciona a massa e o diâmetro da esfera, assim como a viscosidade do meio com a velocidade limite alcançada.

A verificação das relações entre as grandezas relevantes no problema da queda é feita através do *controle de grandezas físicas (parâmetros, variáveis)*, que consiste em selecionar uma das variáveis independentes do conjunto de variáveis que compõem o modelo teórico em estudo; variamos experimentalmente a grandeza selecionada, mantemos as demais grandezas independentes fixas e medimos a variável dependente, isto é, a grandeza em estudo. No caso do movimento de queda de corpos em meios viscosos, selecionamos como grandeza dependente a *velocidade limite de queda* a qual procuramos correlacionar com as variáveis relevantes como a massa da esfera, o diâmetro (forma geométrica do corpo e seu tamanho) e a viscosidade do meio fluido.

Dessa forma mostramos como uma atividade que poucas vezes foi estudada sistematicamente na educação básica, devido às dificuldades com a matemática que envolve o fenômeno e com o desenvolvimento de experimentos relacionados, pode ser desenvolvida *na sala de aula* na educação básica com a utilização das FEDs. Com a metodologia do controle de grandezas espera-se que os alunos verifiquem as relações entre as três grandezas controladas e a *velocidade limite*, construindo com isso um modelo simples para o problema.

## Capítulo 2

### A problemática do ensino de Física

As mudanças de paradigma no ensino de Ciências nas últimas cinco décadas, que apontam para a necessidade de um ensino de Física na escola com forte componente experimental, ainda não chegaram plenamente à sala de aula. Neste capítulo serão analisados alguns dos problemas que contribuem para que a Física, enquanto ciência experimental, seja ensinada de forma exclusivamente teórica, com ênfase no simbolismo abstrato e/ou no ensino puramente discursivo.

#### 2.1. Um panorama atual do ensino de Física

Tanto no Brasil como em muitos outros países o primeiro contato dos estudantes com a Física ocorre na educação básica. O conteúdo curricular trabalhado inicia-se nos conceitos das grandezas fundamentais, espaço, tempo e massa e suas relações. Essas grandezas, juntamente com as respectivas unidades de medida são apresentadas aos alunos de forma simbólico-descritiva e, a seguir, as grandezas derivadas são introduzidas de forma semelhante.

A Física assim apresentada não difere muito da apresentada em outros países. Pode-se citar como exemplo os EUA, como Arons (1998) descreve criticamente a forma como a maioria dos professores “introduz” os conceitos fundamentais de mecânica na escola e cita um exemplo de como a Física é “ensinada” em seu país: *Suponha que um objeto percorre a distância  $d$  em um intervalo de tempo arbitrário  $t$ . Definimos velocidade média  $v$  como  $v = d/t$* . De maneira similar são introduzidas a aceleração, a equação do deslocamento e a equação de Torricelli.

Hewitt (2002) diz que a cinemática domina a “*parte do leão*” de um curso introdutório de Física, constituindo-se no “*buraco negro*” do ensino de Física, afirmativa com a qual concordamos. Esse autor ainda coloca: (...) *gasta-se muito tempo (grifo nosso) para se obter muito pouco*. Para esse autor, é uma incoerência a utilização de estratégia simbólico-dedutiva numa disciplina que busca a compreensão de conceitos. Os símbolos apresentados aos alunos aparecem aos seus olhos como as equações abaixo se apresentam até mesmo para os mais experientes:

$$\zeta = \zeta_0 + \delta \epsilon$$

$$\zeta = \zeta_0 \epsilon + \frac{1}{2} \delta \epsilon^2$$

$$\zeta^2 = \zeta_0^2 + 2\delta\zeta$$

$$\zeta\alpha = (\zeta_0 - \zeta)/2$$

Figura 1 - O simbolismo abstrato não tem significado para o aluno (HEWITT, 2002)

Sendo a Física uma ciência experimental, quando ela é ensinada com ênfase no simbolismo os objetivos referentes à compreensão dos conceitos, aos procedimentos experimentais e a afeição dos alunos para com a ciência ficam relegados, seu conteúdo fica mistificado e a aprendizagem prejudicada, pois a simbologia adotada não tem significado para o estudante. Conceitos que levaram milênios para serem construídos são apresentados rapidamente e de forma superficial.

## 2.2. Breve histórico das ações para a melhoria do ensino de Física no Brasil

No Brasil, houve várias tentativas de melhoria na qualidade do ensino de Ciências e podem-se mencionar como relevantes as seguintes:

### 1. Introdução de projetos no ensino de Física com ênfase na teoria-experiência

Nos anos 50 e 60 do século passado os EUA envidaram esforços na elaboração dos grandes projetos curriculares para a melhoria efetiva do ensino das Ciências Naturais, e o Brasil importou alguns desses projetos. Os esforços oficiais na implantação desses projetos demonstram que houve preocupação em relação à qualidade do ensino de Ciências.

Para a Física foi o PSSC (*Physical Science Study Commitee*) que, conforme Perini *et al.* (2009):

*(...) se constituiu em um projeto com uma proposta metodológica revolucionária, utilizando material textual diferenciado, com uma linguagem moderna e uma seqüência conceitual nova, incorporando tópicos conceituais até então pouco explorados. A motivação filosófica do PSSC baseava-se na busca da participação ativa do aluno em todas as atividades. Assim sendo, com os diferentes recursos didáticos buscava sempre uma inter-relação entre situações-problema, prática experimental e desenvolvimento teórico da Física, apresentando ao aluno uma visão diferenciada da ciência escolar, aproximando-a da atividade científica. Perini et al.(2009)*

Pela mesma razão em 1965 foram criados pelo MEC seis centros de treinamento para os professores de Ciências nas seguintes capitais: Rio de Janeiro (CECIERJ), Belo Horizonte (CECIMIG), São Paulo (CECISP), Porto Alegre (CECIRS), Recife (CECINE) e Salvador (CECIBA).

## 2. Produção de material didático adequado

Como os projetos estrangeiros não se adequaram às condições brasileiras, em 1972 o MEC criou o Projeto Nacional para a Melhoria do Ensino de Ciências, que teve como objetivos principais a capacitação de recursos humanos e a elaboração e experimentação de materiais didáticos adequados às condições brasileiras (NARDI, 2005). Naquele mesmo período foram desenvolvidos projetos nacionais de ensino de Ciências, como o PEF (1980), desenvolvido pelo Instituto de Física da USP.

## 3. Apoio às instituições e aos encontros

Outro fato que demonstrou o apoio do poder público aos esforços para a melhoria qualitativa do ensino de Ciências foi o auxílio financeiro, através de organismos governamentais como o CNPq e a CAPES, aos Simpósios Nacionais de Ensino de Física, promovidos pela Sociedade Brasileira de Física (SBF):

*Em sua condição de Simpósio Nacional, os SNEFs procuram contribuir de forma significativa para o intercâmbio de idéias e das múltiplas experiências vivenciadas pelos seus participantes. Nesse contexto, a comunidade de Ensino de Física e Ensino de Ciências em geral e aqueles interessados e/ou de alguma forma ligados ao tema são convidados a participar do XIX SNEF, seja apresentando relatos de suas atividades de pesquisa, relatos de suas experiências de docência, relatos decorrentes de outros projetos ou na condição de ouvinte. (SBF, acessado em 17-01-2011)*

Atualmente esses simpósios são realizados a cada dois anos em diferentes cidades brasileiras e ainda representam uma oportunidade para os professores participarem de cursos e oficinas, contribuindo para sua formação profissional.

## **2.3. A persistência do ensino tradicional**

Mesmo após décadas de esforços no sentido de melhorar as condições do ensino de Ciências, e em particular de Física, pouca diferença há entre a forma como se ensina hoje da forma como se ensinava antes dos projetos estrangeiros serem criados. Ainda hoje, como Elia (1982) observou quase 30 anos atrás, podemos dizer que (...) *é uma situação paradoxal no sentido de ser uma ciência experimental que é ensinada de forma teórica* (ELIA, 1982). O baixo rendimento dos estudantes demonstra que é preciso mudar o ensino no Brasil. Isso pode ser verificado nos resultados dos testes que avaliam o nível de habilidade científica, como o PISA. Conforme diz Barroso e Franco (2008), *os níveis máximos de habilidade cognitiva avaliados pelo PISA não são alcançados pelos estudantes brasileiros* (BARROSO e FRANCO, 2008).

Nesta seção é feita uma análise dos principais motivos que contribuem para que o ensino de Física não atinja a eficiência desejada.

### **2.3.1. O baixo número de professores com formação específica**

No Brasil há um grande déficit de professores com formação específica de todas as disciplinas em todos os níveis, e o maior é o de professores de Física. Esse é um problema que contribui significativamente para o ensino *livresco*.

Segundo dados do INEP, em 2008 havia no Brasil um total de 61.830 estabelecimentos públicos e privados que ofereciam Ensino Médio em todas as modalidades e um total de 44.566 professores de Física, dos quais apenas 11.238 tinham formação específica (RUIZ, 2007). Em outras palavras, apenas 25% dos professores de Física tem formação específica. Para suprir a carência, profissionais de outras áreas, como Matemática, Química e Biologia, que por resolução dos Conselhos Estaduais de Educação estão habilitados a lecionarem Física desde que possuam, em sua formação, uma carga horária mínima de Física de 160 horas, como é o caso do Rio de Janeiro (Parecer 033/2006), assumem a docência em Física. Esses mesmos dados informam que na época da pesquisa havia um número maior de professores formados em Matemática lecionando Física no Brasil (são 15.170) do que profissionais com formação específica.

Ainda mais preocupante é saber que existem profissionais de áreas muito afastadas, tais como Biblioteconomia, Estudos Sociais e até Direito lecionando Física.



Esse fato mostra a preocupação do poder público em relação aos índices quantitativos da educação, preocupação esta que parece substituir a qualidade do ensino para a formação do cidadão que contribuirá para o desenvolvimento do país em plena era tecnológica. Esse fato pode ser observado através da grande quantidade de notícias veiculadas recentemente sobre ações na educação. No Rio de Janeiro, que esteve nas últimas posições nas avaliações nacionais sobre aprendizado, o IDEB, o governo estadual lançou o Plano Estadual de Educação, Lei nº 5597 de 18 de dezembro de 2009.

### **2.3.2. Deficiências de cultura experimental no Brasil**

No Brasil há questões culturais que influenciam na escolha por uma aula centrada no discurso em vez da experimentação. É um problema que tem raízes antigas, e se constitui numa grande barreira para a implementação de uma cultura mais experimental do ensino de Ciências. Como coloca Elia:

*O ensino experimental tem sido marginalizado em nossos sistemas educacionais, não por causa de alguns fatores determinantes, mas sim, porque esta modalidade de ensino não tem tradição ou raízes em nosso meio cultural. Vivemos em uma sociedade em que os membros parecem preferir o discurso à evidência. Consequentemente, dentro do contexto de ensino de ciências desta sociedade e com raras exceções, o ensino experimental tem sido marginalizado e o ensino teórico – calcado em discurso – tem predominado. Elia (1982)*

Essa característica da nossa cultura explica o porquê de um grande número de professores não “gostar” de dar aulas experimentais. Nesses casos há uma barreira ainda maior a ser transposta na busca de um ensino de Física menos teórico. Como podemos verificar com a experiência profissional vivenciada hoje nas escolas os problemas não são diferentes, quase trinta anos depois.

### **2.3.3. A persistência do ensino tradicional**

Segundo Colinvaux (2008), o ensino tradicional persiste porque por longos anos as ações se concentraram na forma do *como se ensina* desvinculada da *forma do como se*

*aprende*. Isso ocorreu por herança da tradição comportamentalista da psicologia. Aprender implica na aquisição de um repertório de respostas corretas, aquisição esta que, no contexto escolar, resulta da intervenção do professor, planejada e sistematizada: o ensino.

*Fica claro que os esforços se concentraram inteiramente no pólo do ensino, o que explica, aliás, a expressão “pesquisa em ensino de Física, de Biologia, de Química ou de Ciências”. Os projetos são elaborados a partir de decisões em cadeia, que determinam o que, quando e como ensinar, o último elo da cadeia sendo a aprendizagem, aparentemente necessária e inevitável, por parte do aluno. (COLINVAUX, 2008)*

Para essa visão de ensino não resta outra opção ao aluno senão aprender. Caso isso não ocorra o problema está no último elo da cadeia, que é o aluno. Se ele não aprende é porque tem deficiências de aprendizagem ou de conteúdos que foram ensinados em etapas anteriores.

#### **2.3.4. As dificuldades impostas pelas condições de trabalho**

Um levantamento feito por Magalhães (1979) identificou os motivos relatados por professores que impediam a adoção do ensino experimental, mesmo que as escolas possuíssem laboratórios e materiais necessários às práticas:

- *Os tamanhos das turmas;*
- *A não remuneração do tempo necessário à preparação das práticas e da inexistência de auxiliar de laboratório;*
- *O fato de as escolas estarem voltadas para preparar os alunos para o vestibular;*
- *A insuficiência da carga horária, pois com a adoção de aulas práticas, o tempo não será suficiente para cumprir o programa;*

Como se pode confirmar através da prática docente, é possível transferir para 2011 praticamente todos os motivos acima descritos. Nas escolas onde havia algum material necessário e que não estavam voltadas para o vestibular, como as estaduais, eram comuns os discursos de que “*têm-se que gastar muito tempo revendo matéria básica – os alunos não sabem fazer contas nem sabem ler.*” (MAGALHÃES, 1979).

## **2.4. Problemática atual**

Como relatado nas seções anteriores, há mais de cinco décadas que existe uma clara preocupação com os aspectos que dificultam a inserção de uma cultura experimental e no uso do trabalho de laboratório como método de ensino das ciências experimentais. Contudo o cenário atual não difere muito do que foi descrito. Sempre foi um ponto de vista comum entre os educadores de que é difícil chegar a uma boa aprendizagem das ciências experimentais pondo à margem a própria experimentação, que fundamenta uma boa parte do método científico, e utilizando somente a lousa e o giz.

O objetivo buscado é a adoção de uma atitude ativa de interrogar a natureza através da observação do comportamento dos fenômenos e de inferências feitas a partir dos dados coletados. É preciso ligar os conhecimentos adquiridos na sala de aula à prática científica, onde se verificam as hipóteses em vez de expô-las, onde se descobrem leis em vez de aprendê-las. Para isso temos que buscar estratégias que contribuam eficientemente com recursos didáticos alternativos, como é a proposta deste trabalho.

## Capítulo 3

### O ensino experimental na educação básica

Há mais de meio século as discussões sobre as funções do laboratório de Física na educação básica mostram a preocupação pela familiarização dos alunos com os vários aspectos da relação da Física com a realidade. Argumentos de que os exercícios de laboratório e as condições adequadas de aprendizagem são importantes para estimular o interesse dos alunos, e que estes podem ser facilmente incorporados à estrutura existente nas escolas da educação básica, também são antigos (NEDELSKY, 1958). Não obstante, esses problemas ainda hoje se encontram na agenda da pesquisa em ensino de ciências, pois *na prática, na escola, na sala de aula, passa-se muito pouco em termos de mudanças que possam ser consideradas consequência clara do conhecimento produzido pela pesquisa nessa área* (MOREIRA, 1999).

Neste capítulo são discutidos propostas e enfoques dados às atividades de laboratório na escola, assim como as potencialidades e as dificuldades das mesmas.

#### 3.1. As orientações para o ensino de Ciências no Brasil: A LDB e os PCN's

Muitas são as metas que podem ser atingidas através das atividades práticas nas aulas de ciências. Algumas foram estabelecidas pelos currículos para educação em ciências, e no Brasil, os PCNs (BRASIL, 1999) sugerem objetivos relacionados especificamente ao ensino experimental:

- Desenvolver a capacidade de investigação física. Classificar, organizar, sistematizar. Identificar regularidades. Observar, estimar ordens de grandeza, compreender o conceito de medir, fazer hipóteses, testar.
- Conhecer e utilizar conceitos físicos. Relacionar grandezas, quantificar, identificar parâmetros relevantes. Compreender e utilizar leis e teorias físicas. Compreender a Física presente no mundo vivencial e nos equipamentos e procedimentos tecnológicos. Descobrir o “como funciona” de aparelhos.
- Construir e investigar situações-problema, identificar a situação física, utilizar modelos físicos, generalizar de uma a outra situação, prever, avaliar, analisar previsões.
- Articular o conhecimento físico com conhecimentos de outras áreas do saber científico. (BRASIL, 1999)

Outros objetivos que devem ser destacados são aqueles que envolvem elementos históricos, éticos, culturais e estéticos que reconhecem a Física enquanto construção

humana, aspectos de sua história e relações com o contexto cultural, social, político e econômico:

- Reconhecer o papel da Física no sistema produtivo, compreendendo a evolução dos meios tecnológicos e sua relação dinâmica com a evolução do conhecimento científico.
- Dimensionar a capacidade crescente do homem propiciada pela tecnologia.
- Estabelecer relações entre o conhecimento físico e outras formas de expressão da cultura humana.
- Ser capaz de emitir juízos de valor em relação a situações sociais que envolvam aspectos físicos e/ou tecnológicos relevantes. (BRASIL, 1999)

De forma geral observa-se que as estratégias adotadas em sala de aula não respondem aos objetivos citados pelos PCNs. Quando o professor desenvolve uma aula “experimental” ou “contextualizada” o faz *senão como elemento de motivação, como adorno ou complemento cultural* (MENEZES, 2000). Essa prática persiste ainda nos dias de hoje porque na maioria dos casos o ensino ainda é propedêutico, e seu aprendizado somente fará sentido, ou não, em etapas posteriores à escolarização.

Os PCNs não prescrevem metodologias específicas para a Física, mas apresentam recomendações gerais para o ensino das Ciências e, ainda assim, como Menezes (2000) sugere, *sem adotar uma única escola de pensamento pedagógico*. Ainda interpretam sua posição sobre o papel da atividade em sala de aula:

*O aprendizado não deve ser centrado na interação individual de alunos com materiais instrucionais, nem se resumir à exposição de alunos ao discurso professoral, mas se realizar pela participação ativa de cada um e do coletivo educacional numa prática de elaboração cultural.* (PCN, 1999)

Portanto, para atingir os objetivos estabelecidos pelos PCNs, podem-se usar diversas estratégias, e é possível reconhecer que todas têm caráter de atividades laboratoriais.

A elaboração e publicação dos documentos que formam a base curricular do Ensino Médio no Brasil oficializaram os esforços governamentais para as mudanças no ensino de ciências. Como Borges (2002) coloca, *as modificações nestas metas acarretam alterações nos próprios conteúdos e técnicas de ensino*. O que mais comumente expressa aquilo que os estudantes devem aprender tem sido para esse autor: i) adquirir conhecimento científico;

ii) aprender os processos e métodos das ciências; e iii) compreender as aplicações da ciência, especialmente as relações entre ciência e sociedade.

*De acordo com essa proposta, os estudantes deveriam conhecer alguns dos principais produtos da ciência, ter experiência com eles, compreender os métodos utilizados pelos cientistas para a produção de novos conhecimentos e como a ciência é uma das forças transformadoras do mundo. (BORGES, 2002)*

A seguir são discutidas as formas mais usuais de estratégias utilizadas no ensino de Física, as quais visam contemplar um aprendizado estabelecido para a educação em Ciências que deve ser desenvolvido através de atividades práticas.

### **3.2. O enfoque dos experimentos clássicos**

A maneira clássica de utilizar um experimento é aquela em que o aluno aprende como utilizar instrumentos e equipamentos, métodos, a observar um fenômeno e a verificar uma lei física controlando as grandezas relevantes (SÉRÉ, 2003). Nessa abordagem, o experimento está relacionado com a comprovação de uma determinada lei ou com a determinação de uma constante física. Os alunos são orientados através de roteiros estruturados e programados.

Para Carvalho (2008) quando desenvolvidas dessa forma, as atividades experimentais pouco contribuem para o engajamento reflexivo do aluno. Não há oportunidade para que os alunos indaguem sobre problemas relacionados aos fenômenos naturais, pois lhes é apresentada uma ciência acabada, sem possibilidade de discussões.

Segundo Nedelsky (1965) com os experimentos clássicos raramente é permitido ao aluno dizer o que pensa sobre o desenvolvimento de um experimento. Ele tem pouco tempo para refletir sobre suas observações. De fato, durante o período normal de laboratório não há quase nenhum tempo para pensar e, assim, para aprender.

### **3.3. O enfoque de demonstração de fenômenos físicos**

Outra forma usualmente trabalhada na escola é a demonstração de um fenômeno. Essa metodologia tem como vantagem a ilustração dos conceitos que estão sendo

ensinados e a possibilidade de promover interações entre os alunos de diferentes níveis cognitivos que, somadas às intervenções do professor, podem ajudar na compreensão desses conceitos. (ERTHAL, 2006).

Para que o resultado seja eficiente, essas atividades devem ser desenvolvidas aplicando-se estratégias pedagógicas que possibilitem aos alunos interagirem com o fenômeno, analisando, descrevendo e confrontando suas concepções espontâneas. As interações de um aluno com seus pares possibilitam trocas, e *é na troca com outros sujeitos e consigo próprio que nele se internalizam conhecimentos, papéis e funções sociais, o que permite a construção de conhecimentos e da própria consciência* (VYGOTSKY, 1989 apud ERTHAL, 2006). Perguntas que desafiem aos alunos a explanarem sistematicamente de forma oral e por escrito as observações relacionadas aos fenômenos demonstrados podem permitir que *muitos estudantes possam expandir os limites de suas habilidades bem mais do que fariam sozinhos* (CARLSEN, 2006).

### **3.4. O enfoque de atividades de investigação**

A ideia de buscar na atividade experimental a superação de um ensino discursivo e a solução para a falta de interesse pela aprendizagem das ciências conta com uma larga tradição (CARRASCOSA, 2006). As críticas aos experimentos clássicos, associados aos roteiros que servem como guias para apresentar a ciência como acabada, se acumularam ao longo dos últimos anos. Em contrapartida a produção acadêmica tem buscado orientar as atividades experimentais como uma investigação científica (ARRUDA, 2001).

Com a metodologia de investigação científica muitas são as funções dadas ao papel do laboratório de Física. Pode-se citar como exemplos:

- Dar ao estudante a oportunidade de explorar os vários aspectos da relação entre a descrição física da realidade e a própria realidade, fazer generalizações (NEDELSKY, 1965)
- Desenvolver uma curiosidade mais específica sobre como funcionam as tecnologias e o mundo natural (LEMKE, 2006).
- Desenvolver a compreensão de que a ciência constitui uma forma diferente de se pensar e falar sobre o mundo, e que ela deve ser entendida como uma cultura que tem suas regras, seus valores e sua linguagem própria (CARVALHO, 2008).
- Vivenciar e desenvolver importantes aspectos presentes na cultura científica, como a argumentação, o raciocínio hipotético-dedutivo e o estabelecimento de relações compensatórias (LOCATELLI, 2007).

Como se pode perceber pelo exposto acima, as atividades de laboratório têm objetivos que vão além de ensinar um conteúdo da Física. Diante disso, surgem problemas a ser enfrentados pelo professor durante o planejamento, e um deles é quanto ao tempo de desenvolvimento da atividade. Muitas vezes os alunos e os professores perdem tempo excessivamente com detalhes técnicos de montagem de experimentos e/ou manipulação de equipamentos. Mesmo sendo um dos objetivos do ensino no laboratório, permitir que o aluno interaja com instrumentos e desenvolva experimentos (NEDELSKY, 1965), esses importantes detalhes devem ser transpostos, pois durante a realização das atividades os alunos precisam de tempo suficiente para construir seus próprios conhecimentos. O aluno deve ter oportunidade de interagir e refletir sobre idéias centrais, expressar suas interpretações e crenças sobre o significado do fenômeno investigado, elaborando e aplicando sua própria aprendizagem, o que pode resultar em melhor compreensão.

Em outras palavras os estudantes precisam ter tempo para o desenvolvimento de atividades metacognitivas (BAIRD, 1990). Estas habilidades são resultados da aprendizagem associada a determinadas ações tomadas conscientemente pelo aluno durante um episódio de aprendizagem específica. Neste processo é essencial oferecer oportunidades que estimulem os alunos a fazer perguntas, sugerir hipóteses e projetar investigações, trabalhando tanto com a mente quanto com a mão (*minds-on, hands-on*). Há uma necessidade de proporcionar aos alunos oportunidades freqüentes para *feedback*, reflexão e modificação de suas idéias (BARRON, 1998).

Para desenvolver essas propostas é importante que o professor defina as seguintes etapas: formulação do problema, elaboração de hipóteses, planejamento de experimentos, coleta dos dados e análise/interpretação dos resultados. Ou ainda, de forma mais detalhada,

- i) uma situação problemática aberta é colocada inicialmente;*
- ii) a partir de um corpo de conhecimentos (teoria) a situação é analisada e o problema é definido de uma forma mais precisa;*
- (iii) Em seguida são elaborados modelos, hipóteses e estratégias para a contrastação empírica das mesmas, o que inclui o planejamento e a realização de experimentos;*
- (iv) Após obtidos, os resultados são interpretados e comunicados (a outras equipes), o que pode levar à verificação ou falseamento das hipóteses e construção de novos conhecimentos; modificação das crenças e atitudes, bem como das concepções sobre a ciência; novos problemas; revisão da investigação (SALINAS, 1994 apud ARRUDA, 2001).*



Nesse tipo de abordagem, o professor muitas vezes surpreende-se pelas dificuldades dos alunos (SÉRÉ, 2003). Observa-se que mesmo aqueles capazes de conhecer a dinâmica da atividade, apresentam uma série de dúvidas que precisam ser pouco a pouco esclarecidas e trabalhadas, até que eles consigam entender o que está por trás da atividade, o que seria praticamente impossível, sem o auxílio do professor e tempo suficiente (ARRUDA, 2001).

Investigar é uma atividade multifacetada que envolve fazer observações, fazer perguntas, examinando livros e outras fontes de informação para ver o que já é conhecido à luz da evidência experimental. É necessário saber usar ferramentas para coletar, analisar e interpretar dados, propondo respostas, explicações e previsões, e comunicar os resultados. Investigar exige a identificação dos pressupostos, a utilização de pensamento crítico e lógico, e consideração de explicações alternativas (HOFSTEIN, 2003). O aluno só conseguirá questionar o mundo, manipular os modelos e desenvolver os métodos se ele mesmo entrar nessa dinâmica de decisão, de escolha, de inter-relação entre a teoria e o experimento.

É inegável a semelhança de tais passos ou etapas, com a seqüência de operações do *método científico, que tem como fundamento o processo de “conjecturas e refutações” ou a utilização do raciocínio hipotético-dedutivo. Talvez a aplicação desse método, com a finalidade de conhecer objetivamente o mundo, “faz toda a diferença entre ciência e não-ciência”* (ARRUDA, 2001).

### **3.5. Discussão**

Neste capítulo foram destacados três tipos de laboratório didático: o experimento clássico, a demonstração de experimento e a atividade investigativa. Alves Filho (2000) faz um resgate histórico de algumas abordagens, concepções e enfoques dados ao laboratório didático, varrendo um largo espectro de possibilidades. Pode-se destacar em seu trabalho o *Laboratório Biblioteca*, o *Laboratório de Projetos* e o *Laboratório Circulante*. Isso mostra que são muitas as possibilidades disponíveis para buscar as metas desejadas para o ensino de Física. Nossa posição perante os enfoques de laboratório é que todos podem ser úteis na busca das metas para o ensino de Física citadas na Seção 3.1, mas sem a elaboração de

alguma estratégia, dificilmente as atividades experimentais contribuirão para a eficiência no aprendizado.

## Capítulo 4

### Uma abordagem da queda dos graves na educação básica

(...)  
*Eu queria agradecer-te, Galileo,  
a inteligência das coisas que me deste.  
Eu,  
e quantos milhões de homens como eu  
a quem tu esclareceste,  
ia jurar – que disparate, Galileo!  
- e jurava a pés juntos e apostava a cabeça  
sem a menor hesitação -  
que os corpos caem tanto mais depressa  
quanto mais pesados são.  
Pois não é evidente, Galileo?  
Quem acredita que um penedo caia  
com a mesma rapidez que um botão de camisa ou que um seixo de praia?  
Esta era a inteligência que Deus nos Deu.  
(...)*  
**(Poema de GEDEÃO, 1979)**

Neste capítulo iniciaremos uma discussão sobre o estudo do movimento de queda dos corpos a partir de uma modelagem mais realista, fenômeno escolhido para ser abordado com a análise de FEDs. Esse fenômeno foi escolhido por dois motivos básicos: primeiro, porque é importante que os alunos em sua formação científica estudem os fenômenos naturais em aproximações teóricas sucessivas desde o simples até o relativamente mais complexo de forma a possibilitar uma vivência mais próxima do método científico. Por sua vez, os movimentos reais, de inegável importância prática, dificilmente são tratados na educação básica: por exemplo, a maioria dos movimentos observados na natureza sofre resistência do meio onde ocorrem e o assunto não é tratado com a importância devida; segundo, por que é uma boa contribuição para o ensino de Física mostrar que a análise de fotografias estroboscópicas pode se constituir numa boa alternativa em substituição ao espaço formal do laboratório de mecânica. Trata-se de uma ferramenta poderosa, tanto mais quando verificamos que não há laboratório didático que permita estudar experimentalmente os efeitos da resistência do ar no movimento de queda de corpos, mas com as fotografias estroboscópicas digitais isso é possível. Tudo que se move pode ser filmado e depois analisado através dessas fotografias, e com estratégia de ensino e materiais instrucionais apropriados pode se configurar em objeto de aprendizagem e desenvolvimento das habilidades e competências buscadas para o ensino de Física.

A discussão se inicia com a análise de alguns dos livros didáticos editados desde meados do século passado até aqueles usados nos dias de hoje a fim de verificar como e quando o movimento de corpos com resistência do meio foi abordado na educação básica. Será feita uma discussão sobre o estudo da queda livre, ressaltando os aspectos mais relevantes dos trabalhos de Aristóteles e Galileu, e a mecânica do movimento de queda, com e sem resistência do meio fluido. Esta última parte se fez necessária para que o professor interessado em desenvolver a atividade aqui sugerida possa ter subsídios para a elaboração do seu planejamento. Serão comparadas as funções posição e velocidade dos movimentos de queda idealizados e de queda em meios fluidos

#### **4.1. Abordagem nos livros didáticos**

Um bom referencial histórico para balizar o início do ensino de Física no Brasil é o lançamento do projeto pedagógico do PSSC, que foi traduzido para a língua portuguesa pela Editora Universidade de Brasília em 1963. Antes dessa época o ensino era livresco ou puramente discursivo. Com o PSSC buscou-se unificar teoria e prática utilizando recursos de vídeos e experimentos. Antes do lançamento do PSSC havia como material didático apenas livros textos. Moreira (2000) cita que o seu lançamento marcou uma época de mudança de paradigma: dos livros para os projetos. Por isso faremos uma breve análise de alguns textos utilizados a partir do lançamento do PSSC. Dividiremos nossa análise entre livros antigos (séc. XX) e atuais (séc. XXI), inclusive alguns livros selecionados no PNLEM.

Os livros textos antigos analisados foram: o *PEF* (1980), o *Projeto Harvard* (1985), o *PSSC* (1967) e o *Física na escola secundária* (BLACKWOOD et al 1971). Dentre esses livros o único que abordou o movimento com resistência do ar foi o *Física na escola secundária* de Blackwood et al. Neste texto, a resistência do ar é tratada no Capítulo *Forças atuando juntas*, quando explica as forças que agem num aeroplano. Algumas considerações são feitas sobre a dependência da força de resistência do meio sobre o corpo em função da sua forma, da velocidade relativa entre o corpo e o meio e da viscosidade do meio. Há também uma breve explanação sobre o atrito viscoso que age sobre corpos em queda. Não há exemplos numéricos ou exercícios a respeito.

Listamos abaixo a forma como o tema é abordado em alguns dos livros didáticos atuais, inclusive livros que foram selecionados pelo PNLEM:

- No livro dos autores Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga *Física – volume 1* (DA LUZ E ALVAREZ, 2005) a Seção 5.5 é dedicada à análise qualitativa de exemplos de corpos em queda no cotidiano (pára-quedistas, queda de meteoros e gota de chuva). A abordagem é qualitativa, Capítulo 5, quando trata a Segunda Lei de Newton. São também propostos exercícios como perguntas de compreensão conceitual.

- No livro de Alberto Gaspar *Física – mecânica* (GASPAR, 2002) é mencionado de forma explícita que as análises de movimentos no campo gravitacional são feitas desprezando-se a resistência do ar, mas comenta sumariamente o conceito de velocidade limite num *box* apresentado como *aprofundamento*. No Capítulo 8, p. 107, explica-se o fato de não abordar a resistência do ar devido à sua complexidade, mas discute o efeito do meio quando trata do movimento de projeteis. Esse tratamento é feito na apresentação da Cinemática, antes de abordar o conceito de força. Não há exercícios, sendo o tratamento desses conceitos puramente descritivo.

- Num dos livros mais populares no ensino de Física, dos autores Francisco Ramalho Junior, Nicolau Gilberto Ferraro e Paulo Antônio de Toledo Soares *Os Fundamentos da Física – volume 1* (JUNIOR ET AL, 2003), no Capítulo 12, em duas seções apresentam-se análises qualitativas e quantitativas da força de resistência do ar sobre os corpos, inclusive equação da força de arraste. O tema é contextualizado no movimento de pára-quedistas e nos testes feitos na aerodinâmica de automóveis em túneis de vento. Apresentam-se também exercícios conceituais e de aplicação numérica das equações da força e do cálculo da velocidade limite.

- O livro do GREF *Física 1: mecânica* (GREF 2001) direcionado ao professor, livro que é fruto de uma parceria entre professores da rede estadual de São Paulo e docentes do Instituto de Física da USP com o objetivo de elaborar uma proposta de ensino de Física para o Ensino Médio que esteja vinculada à experiência cotidiana dos alunos, o Apêndice 2 estuda da influência da resistência do ar sobre corpos em movimento, contextualizando-o, novamente, no estudo do movimento de pára-quedistas e de gotas de chuva, com exemplos

de aplicação numérica das equações, mas não apresenta exercícios. Já nos *Caderninhos*, que são parte de um material direcionado aos alunos, disponíveis gratuitamente na internet (GREF, acessado em jan. 2011) o Capítulo 17 trata do assunto, e nele são apresentadas tabelas com coeficientes de viscosidade dos líquidos mais comuns e coeficientes de arrasto aerodinâmico de diversos corpos. A discussão é exemplificada com exercícios conceituais. Este livro é o que faz o tratamento de conteúdo mais completo, dando oportunidade para o professor que pretenda aprofundar-se no assunto.

#### **4.1.1. Discussão da análise nos livros didáticos**

A análise feita nos livros antigos e nos atuais mostrou que o estudo do movimento dos corpos que sofrem resistência do meio em que se encontram não foi realizado sistematicamente, fato que pode ser inferido pela pouca presença do tema nos livros didáticos daquela época. Nos textos atuais, não é muito diferente, pois há apenas breves abordagens qualitativas, como citações sobre os efeitos da resistência do ar em movimentos de automóveis (aerodinâmica), o salto dos pára-quedistas e queda das gotas de chuva, dentre outros exemplos do cotidiano das pessoas.

Entretanto, o panorama atual não é de exclusão total. Como podemos verificar, alguns dos livros atuais de Ensino Médio tratam o assunto, apesar de não ser um tratamento sistemático. Podemos concluir com isso que a presença desse tema nos livros serve como uma sinalização positiva para o professor que deseja trabalhar com seus alunos e também para o desenvolvimento de estratégias que aliem teoria e prática. A questão importante nesse momento é que o livro didático pode de certa forma fornecer elementos para que o professor trabalhe, mesmo que superficialmente, o tema com seus alunos. Mas, para que os objetivos de aprendizagem discutidos no capítulo 1 sejam alcançados é importante o professor ter a possibilidade de desenvolver atividades práticas.

Outro fato importante é que sempre que falamos de ensino de Física, citamos a necessidade de contextualização. Assim é de interesse para a boa formação dos alunos o estudo dos fenômenos no mundo real. Hoje, os recursos digitais disponíveis, em particular a produção de fotografias estroboscópicas, permitem superar as dificuldades operacionais de experimentação, e com isso o fenômeno real pode ser trabalhado, com bastante simplicidade, experimentalmente, na sala de aula, como é a proposta deste trabalho.

## 4.2. Um breve histórico do estudo da queda dos corpos

Apesar de não ser objetivo deste trabalho dissertar sobre a história do estudo do movimento de queda dos corpos, é difícil começar uma aula sobre o tema sem que antes seja feita uma explanação sobre a evolução das ideias nessa área.

A percepção humana de que o conhecimento do movimento dos corpos é importante para a sua sobrevivência deve certamente ser tão antiga quanto à própria existência humana. Os nossos ancestrais migravam para fugir de climas inóspitos e da falta de alimentos; caçavam animais que se moviam em velocidades maiores que as do próprio homem, para com isso poderem se alimentar e se proteger do frio com a sua pele; atritavam pedaços de madeira para gerar calor e produzir o fogo, e, mais tarde, aprenderam a entender os movimentos dos astros para saber a melhor época de plantar e de colher os alimentos. Portanto, *ignorar o estudo dos movimentos é ignorar a própria natureza* (HOLTON, 1985).

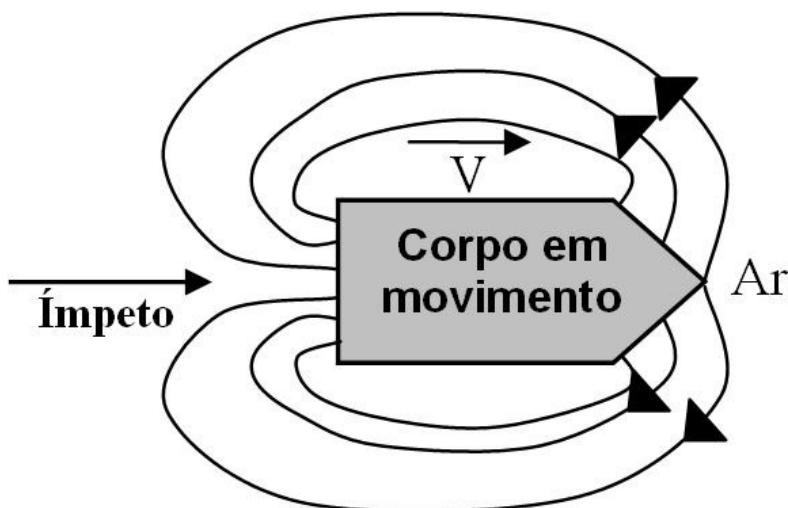
Dentre os movimentos naturais, o de queda dos corpos, sendo o mais natural e imediato, foi sempre objeto de interesse ao longo dos séculos. Os registros de contribuições importantes para o seu estudo remontam aos trabalhos de Aristóteles na Grécia antiga e os trabalhos de Galileu no Renascimento.

### 4.2.1. A queda dos corpos segundo Aristóteles

O primeiro registro de tentativa de compreensão dos movimentos na civilização ocidental foi feito por Aristóteles (384-322 a.C.). Ele dividiu o movimento em duas grandes classes: o *movimento natural* e o *movimento violento*.

O movimento natural decorre da “natureza” do corpo em movimento, isto é, depende da combinação dos quatro elementos básicos que formavam toda matéria, água, terra, fogo e ar. Para todo corpo na natureza existe um lugar natural. Qualquer um que não esteja em seu lugar natural tende em se mover até ele. Essa classe de movimento ocorre sempre na direção vertical. Assim, para um corpo cujo elemento predominante fosse a terra, e ele estivesse fora da terra, o seu movimento natural seria o de queda, como uma fruta que cai de uma árvore; para um corpo cujo elemento predominante fosse o ar, e ele estivesse fora do ar, seu movimento natural seria de subida.

Havia outra categoria de movimento que Aristóteles chamou de *movimento violento*. Eles possuíam esse nome porque era necessária uma força atuando sobre o corpo para que ele se movesse. Por exemplo, os barcos se movem por ação dos ventos, veículos se movimentam por ação dos animais, etc. Todo movimento violento ocorria porque alguma causa externa era comunicada ao objeto através de forças. Uma pedra em movimento recebia um impulso inicial até cessar o contato com a mão do lançador. Após isso ela permaneceria em movimento devido ao ar que deslocava em sua frente e produzia uma força como mostrado na Figura 2, o que Aristóteles chamou de ímpeto:



**Figura 2 -** Representação de um corpo em movimento que para Aristóteles, que acreditava na necessidade de haver força para haver movimento. O ar deslocado da frente do corpo impulsionava-o na parte de trás, e com isso o corpo se movia.

Os movimentos dos corpos celestes diferiam dos movimentos dos corpos terrestres, pois Aristóteles acreditava que esses corpos eram compostos por um quinto elemento que não existia na terra, a quinta-essência.

*Esta ciência física, construída sobre a ordem, a classe, o lugar e a finalidade, encontra-se em razoável acordo com muitos fatos observados cotidianamente. E parecia particularmente plausível em sociedades como aquelas em que Aristóteles e Galileu viveram, onde a posição hierárquica e a ordem eram dominantes na experiência humana (HOLTON, 1985).*



Ainda nos dias de hoje as concepções aristotélicas de movimento são comuns entre os estudantes, principalmente que há necessidade de uma força sobre o corpo para mantê-lo em movimento. Isso mostra que as dificuldades enfrentadas pelos antigos na compreensão do movimento assim como o compreendemos hoje, podem ser as mesmas dos nossos alunos, pois a Física de Aristóteles é fruto de uma construção teórica complexa, mas foi elaborada a partir dos elementos empíricos fornecidos pela vivência humana mais imediata (PORTO, 2009).

Essa vivência é elemento fundamental na construção das concepções espontâneas sobre a natureza dos movimentos. Desde que nasce o ser humano interage com os fenômenos do mundo macroscópico. Em seus primeiros passos aprende a dimensionar qualitativamente distâncias, e quanto maiores elas forem maiores serão os esforços necessários para percorrê-las. Ao transportar objetos massivos faz-se um esforço maior do que o necessário para transportar os menos massivos. Em ambos os exemplos existem a associação entre força e movimento. Talvez por isso exista a crença popular de que para que haja um tem que haver o outro.

Das classes de movimentos citadas nos trabalhos de Aristóteles a que é importante para o estudo da queda livre é o movimento natural, em particular o de queda. Os elementos caem porque em sua constituição química há predomínio dos elementos cujos lugares naturais estão na terra. Aristóteles associou a velocidade de queda do corpo ao seu peso  $P$ , e pensou que qualquer objeto em queda atinge um valor limite de velocidade  $V$ , com a qual continua a se mover até o fim de sua trajetória. Mas não era apenas o peso do corpo que influenciava na velocidade de queda. Mais tarde ele reconheceu que haveria um efeito do meio sobre a velocidade característica de queda, o que ele chamou de resistência  $R$ . Com isso a velocidade era diretamente proporcional ao peso e sofreria uma diminuição com a resistência do meio, ou seja,  $V = P/R$ .

Essa teoria foi aceita por mais de 2000 anos e era plenamente difundida na época de Galileu que, partindo da observação e da experimentação, percebeu inconsistências. Essas inconsistências o levaram a refutá-la.

#### **4.2.2. A queda dos corpos para Galileu**

Foi apenas entre os séculos XV e XVI, quase dois mil anos depois de Aristóteles, que um grande salto foi dado por Galileu ao demonstrar como descrever matematicamente

o movimento dos corpos, tais como pedras caindo e esferas rolando. Seus trabalhos abriram caminho para que outros cientistas descrevessem os diversos tipos de movimentos observáveis na natureza. Era o nascimento da *Ciência Moderna*.

Holton (1985) cita que na obra de Galileu *Diálogo Sobre Duas Novas Ciências* as ideias de Simplicio, personagem representante dos aristotélicos, são refutadas por Salviatti, que é o personagem que representa as ideias de Galileu. A teoria de Aristóteles diz que objetos mais pesados caem mais rápido que os mais leves. Com isso, se uma esfera for 100 vezes mais pesada do que outra esfera, ela deve cair 100 vezes mais rápido, fato que não é observado experimentalmente. Galileu lançou objetos de pesos bastante diferentes e observou que havia sim um retardamento do mais leve em relação ao mais pesado no instante em que este chegava ao chão. Mas a diferença era da ordem de poucos centímetros entre a posição final do objeto mais pesado e a posição do mais leve nesse mesmo instante. O ponto importante nisso não é o fato de que as esferas chegam ao chão em *tempos ligeiramente diferentes*, mas sim que os *tempos de queda são aproximadamente iguais*. Em ciência, *aprender o que se deve considerar é tão importante como aprender o que se deve desconsiderar* (HETCH, 1987).

Foi na época de Galileu que se verificou um grande progresso nas ciências, quando foi reconhecido o valor das descrições matemáticas e das previsões. Essa foi uma grande contribuição de Galileu, e por isso, dentre os grandes cientistas da história da humanidade, ele que foi reconhecido como pai da *Ciência Moderna*, pois demonstrou como descrever matematicamente o movimento de objetos simples. Seus trabalhos abriram caminho não somente para que outros cientistas descrevessem movimentos mais complexos, como os planetários, mas também para iniciar uma revolução intelectual que culminou com o que hoje chamamos de *método científico*.

A seguir serão ressaltados alguns aspectos relevantes do método usado por Galileu para estudar a queda dos corpos. São exemplos importantes para o trabalho de pesquisa e que devem ser considerados durante a realização das aulas nas quais os alunos estudarão experimentalmente a queda dos corpos. Os aspectos mais importantes do método de Galileu foram:

- Extrapolação de resultados - como a rapidez dos objetos em queda aumentava assumindo valores bastantes elevados tornava-se impraticável, àquela época, realizar medidas nos movimentos. Isso se dava porque, como hoje sabemos, a aceleração média da

gravidade tem valor  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Esse valor é bastante significativo, pois mesmo os automóveis de Fórmula-1 podem atingir 320 km/h em 15s, ou seja, aceleram a uma taxa média aproximada de  $6 \text{ m/s}^2$ .

Para driblar esse obstáculo Galileu estudou o movimento de esferas em planos inclinados, pois dessa forma a rapidez aumentava mais lentamente e era possível realizar as medidas de tempo com o rústico relógio de água que ele dispunha e provar que a aceleração era constante para cada inclinação. O valor aumentava para inclinações maiores e, no limite vertical, corresponderia à aceleração da queda livre (HOLTON, 1985). Dessa forma Galileu estava *extrapolando os resultados*.

- Desconsiderar influências externas - ao abandonar objetos de massas diferentes do alto da torre de Pisa, era verificado que eles não alcançavam o chão ao mesmo tempo, mas sim com pequenas diferenças. Em primeira análise essa observação poderia até ser motivo de refutação das propostas de Galileu pelos eruditos dogmatizados da época. Mas Galileu sabia que a resistência do ar influenciava, e por isso colocou que desprezando a resistência do ar, todos os corpos, com independência de seus pesos, caem com a mesma aceleração constante.

Pode-se dizer que a tese de Galileu é uma *idealização*, pois para que o fenômeno ocorra sem resistência do ar é preciso estar no vácuo; e Galileu não tinha como testar essa possibilidade. Entretanto, as inúmeras medições da aceleração da gravidade feitas ao longo dos séculos obtiveram resultados dentro de uma margem de erro tão pequena que os valores são extremamente convincentes. Com isso, pode-se concluir que *todas as coisas caem ao mesmo tempo dentro dos limites de erros experimentais*, e Galileu descartou esses efeitos (HETCH, 1987).

### **4.2.3. Discussão sobre a queda dos corpos para Aristóteles e para Galileu**

Levou cerca de dois mil anos desde Aristóteles a Galileu, para que a humanidade pudesse entender que todos os corpos caem com a mesma aceleração *desde que se desprezem os efeitos da resistência do ar*. Essa é uma situação idealizada e, portanto, dificilmente compreendida sem que as pessoas sejam escolarizadas.

Podemos perceber que nossos alunos, ainda nos dias de hoje, mantêm a concepção aristotélica de que os corpos mais pesados caem mais rápido que os corpos mais leves. Isso ocorre porque a idealização, tão importante para o método científico, não é fácil de ser incorporada pelas pessoas mesmo em etapas posteriores à escolarização. As pessoas vivem num mundo real, onde ocorrem fenômenos reais. O fenômeno de queda real ocorre num fluido e, nesse caso, a diferença de pesos pode causar diferenças no tempo de queda dos corpos.

Talvez o coroamento mais expressivo dos trabalhos de Galileu tenha sido a demonstração realizada pelo astronauta David Scott que deixou cair na superfície da Lua um martelo e uma pena simultaneamente. Como na Lua não há atmosfera ambos caem ao mesmo tempo. O vídeo pode ser assistido na internet:

<http://www.youtube.com/watch?v=03SPBXALJZI>

### 4.3. A dinâmica de corpos em queda

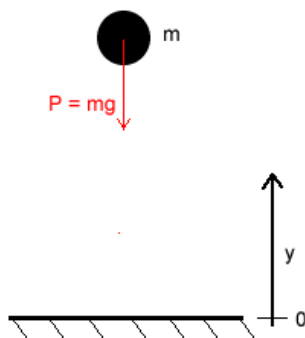
Nesta seção abordaremos a teoria elementar explorada nas disciplinas de Física do ciclo básico dos cursos de graduação. Acreditamos que esses fundamentos são suficientes para um bom planejamento de aulas que tratam este tema no Ensino Médio. Isso porque um tratamento rigoroso requer um aporte muito grande de mecânica dos fluidos, particularmente no que diz respeito à ciência da aerodinâmica, o que está fora do escopo de um curso introdutório para o Ensino Médio.

#### 4.3.1. Corpos em queda livre

Considere um corpo de massa  $m$  que se move numa trajetória retilínea e vertical de queda ao longo do *eixo-y*. Se esse corpo ficar sujeito apenas à ação da força de interação entre sua massa e a massa da Terra, ou seja, à força peso ( $P$ ). Aplicando a segunda lei de Newton temos,

$$\begin{aligned}\sum F &= ma \\ P &= -m.g = m \frac{dv}{dt} . \quad (i)\end{aligned}$$

O sinal negativo da equação (i) indica que o referencial adotado cresce verticalmente para cima e, com isso, o sentido da força peso, que é vertical para baixo, fica negativo.



**Figura 3 - Modelo para a queda de um corpo submetido apenas à força peso.**

Para obter a *função velocidade*  $v(t)$  é necessário integrar a equação (i):

$$\int_{v_0}^v dv = -g \int_0^t dt$$

De onde temos que

$$v(t) = v_0 - gt \quad (\text{ii})$$

Para obter a *função posição*  $(y(t))$  é necessário integrar a equação (ii). Lembrando que

$$v = \frac{dy}{dt}$$

$$\frac{dy}{dt} = v_0 - gt$$

$$\int_{y_0}^y dy = \int_0^t (v_0 - gt) dt$$

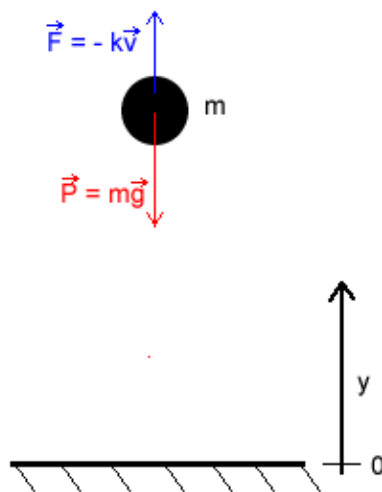
De onde temos que,

$$y(t) = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2} \quad (\text{iii})$$

As equações (ii) e (iii) são as equações do movimento de queda livre, ou seja, movimentos cuja única força atuante é a força peso  $P = m.g$ . Na superfície lunar, por exemplo, onde não há atmosfera, esse modelo físico descreve com boa aproximação o movimento de queda de corpos. Para aplicá-las na superfície da Terra é necessário desprezar a força de resistência com o ar.

### 4.3.2. Corpos em queda com resistência do meio

Ao considerar um corpo que se move numa trajetória vertical ao longo do *eixo-y* que sofre ação de uma força de resistência devido a sua interação com o ar atmosférico, as funções posição e velocidade ficam diferentes, pois ao aplicar a segunda lei de Newton ao movimento de queda surge uma nova parcela relativa a essa força de resistência. Um modelo simples e aproximado para essa força assume que ela é proporcional à velocidade:



**Figura 4 - Modelo de uma partícula em queda, submetida à força peso e à força de resistência do meio fluido, força esta que, com boa aproximação, é proporcional à velocidade.**

$$F_A = -kv = -k \frac{dy}{dt} \quad (\text{iv})$$

O sinal de menos indica que a força de resistência é oposta à velocidade e  $k$  é uma constante de proporcionalidade.

Ao aplicar a segunda lei de Newton para esses movimentos tem-se:

$$-mg - kv = m \frac{dv}{dt}$$
$$-g - \frac{k}{m}v = \frac{dv}{dt}. \quad (\text{v})$$

A relação (v) é uma equação diferencial linear em  $v$ . Se o corpo em queda parte do repouso, inicialmente a parcela correspondente à força de resistência é nula, e o corpo é acelerado apenas pela gravidade. Com os incrementos de velocidade ao longo do tempo, a aceleração devida à parcela da força de resistência tende a se igualar, em módulo, à gravidade. Quando isso ocorre, a resultante das forças passa a ser nula e o movimento segue com velocidade constante. Essa velocidade é chamada de *velocidade limite*  $v_L$ . Das equações acima deduz-se que seu módulo é dado por:

$$v_L = \frac{mg}{k} \quad (\text{vi})$$

Para obter a função velocidade desse movimento é necessário integrar a equação (v), e para isso deve-se fazer a substituição de variáveis. Definindo-se  $u(t)$  como,

$$u(t) = v(t) - \frac{mg}{k}$$

substituindo em (v) e assumindo que o corpo parte do repouso, obtém-se,

$$\frac{du}{dt} = -\frac{k}{m}u$$

$$\int_{-mg/k}^{u(t)} \frac{du}{u} = \int_0^t \left(-\frac{k}{m}\right) dt$$

A integração resulta para o módulo da velocidade,

$$v(t) = \frac{mg}{k} \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{m}}\right) \quad (\text{vii})$$

O primeiro fator multiplicativo, do lado direito da equação acima, é a velocidade limite ( $v_L$ ). Pode-se também escrever a equação (vii) da seguinte forma:

$$v = v_L(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

Na equação acima  $\tau = m/k$  é a chamada *constante de tempo*. De acordo com a escolha feita, no instante inicial  $t = 0$ , a velocidade é nula. Conforme o tempo vai aumentando a velocidade tende progressivamente ao seu valor limite  $v_L$ .

Para obter a função posição é necessário integrar a equação (vii). Como resultado chega-se à relação abaixo:

$$y = -\frac{mg}{k}t + \frac{m^2g}{k^2}(1 - e^{-\left(\frac{k}{m}\right)t}) \quad (\text{viii})$$

Pode-se verificar na equação (viii) que conforme o tempo aumenta o termo entre parêntese tende a zero, e com isso essa equação tende à equação de uma reta, cujo coeficiente angular é a velocidade limite  $v_L$ .

#### 4.4. Simulação de queda livre e da queda em meio viscoso

Para que seja possível a comparação qualitativa entre o comportamento das funções posição e da velocidade de corpos em queda livre com corpos em queda com resistência do meio, faremos uma simulação das duas quedas. Com isso poderemos comparar os gráficos da posição e da velocidade em função do tempo dos dois movimentos. Uma boa estratégia para este fim é a utilização de um aplicativo no qual inserimos os valores de massa ( $m$ ) de da constante  $k$  e obtemos os gráficos dos movimentos. Utilizamos para este fim um simulador em Flash, desenvolvido pelo professor Geraldo Felipe (FILHO, 2010) para servir de ferramenta para o estudo da queda dos corpos. Este simulador está disponível no link abaixo (acessado em 20-03-2011):

[http://omnis.if.ufrj.br/~marta/aplicativos/queda\\_vertical\\_v4.swf](http://omnis.if.ufrj.br/~marta/aplicativos/queda_vertical_v4.swf)



#### 4.4.1. Simulação de queda livre

A condição necessária para que um corpo não sofra uma significativa resistência do meio em pequenas trajetórias é que ele seja denso, por exemplo, uma esfera maciça de aço. Nessas condições diminuimos a constante  $k$  (diminuindo as dimensões do corpo) e aumentamos a massa, aumentando assim a velocidade limite, isto é, diminuimos a força de atrito com o ar e aumentamos o peso. Dessa forma tornamos o empuxo que atua sobre o corpo desprezível em relação ao peso (veremos mais adiante algumas aplicações onde essa aproximação não é válida). Nestas condições, em boa aproximação, a única força a ser considerada é a força peso, ficando o corpo sujeito à aceleração da gravidade. No exemplo a seguir os dados simulados do corpo em queda atende a essas condições, e com isso pode-se ver que os comportamentos da velocidade e da posição são de um Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV):

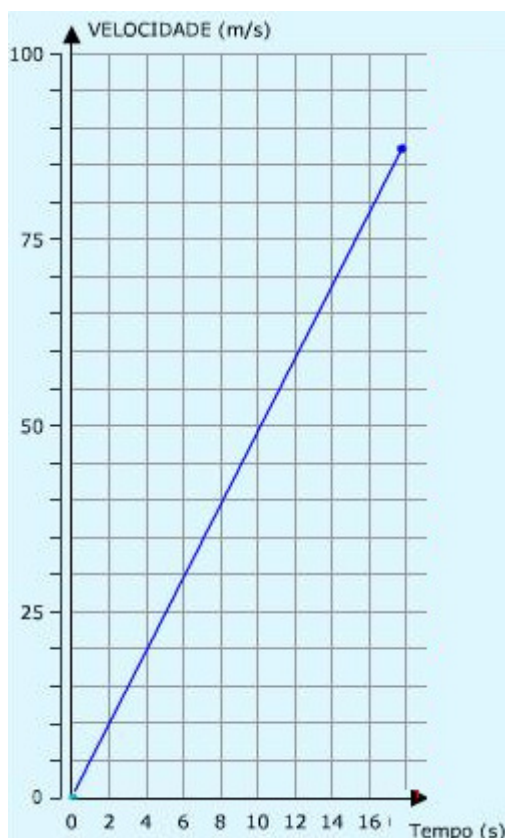


Figura 5 - Gráfico com dados simulados da velocidade em função do tempo de um corpo em queda livre.

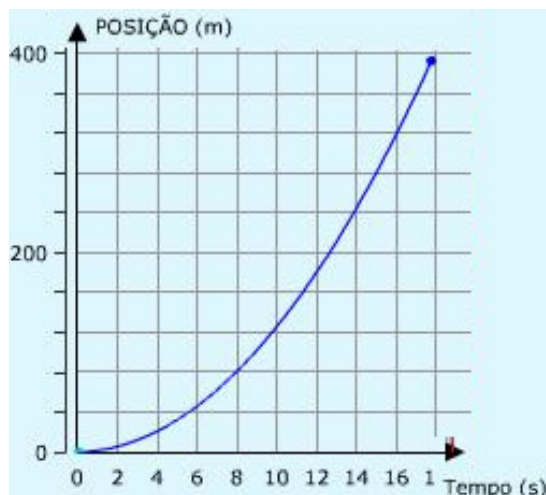


Figura 6 - Gráfico com dados simulados da posição em função do tempo de um corpo em queda livre.

#### 4.4.2. Simulação de queda com resistência do meio

Para estudar a queda com influência da resistência do meio é necessário que o corpo possua baixa densidade. Dessa forma a força de resistência, que é proporcional à velocidade, assume, com o tempo, valores comparáveis à força peso. Para os dados simulados utilizamos o mesmo valor de massa do exemplo da queda livre, mas agora para a constante de proporcionalidade, que no exemplo da queda livre era nula, escolhemos um valor  $k = 0,8$ . Com isso podemos observar uma mudança do regime de MRUV para o MRU, e o corpo em queda atinge uma velocidade limite.



Figura 7 - Gráfico com dados simulados da velocidade em função do tempo de um corpo em queda em meio viscoso.

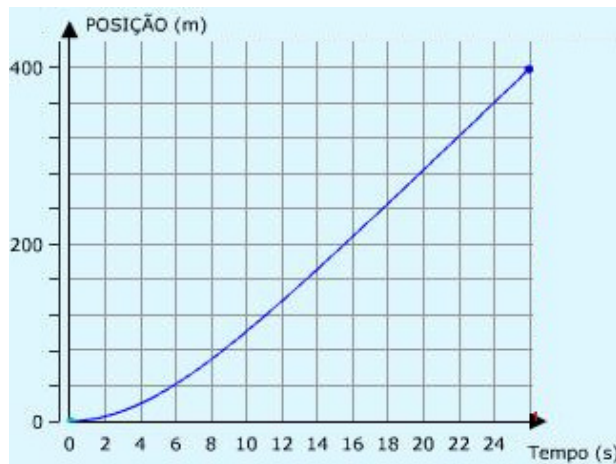


Figura 8 - Gráfico com dados simulados da posição em função do tempo de um corpo em queda livre.

Na Figura 9 estão representados os gráficos e as respectivas funções dos movimentos de queda livre e de queda em meio viscoso do mesmo corpo:

Queda livre		Queda com resistência do meio	
Função	Gráfico	Função	Gráfico
$y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}$		$y = -\frac{mg}{k} t + \frac{m^2 g}{k^2} (1 - e^{-\frac{k}{m} t})$	
$v = v_0 + gt$		$v = v_L (1 - e^{-\frac{kt}{m}})$	

Figura 9 - Comparação entre as funções posição e velocidade para os movimentos de queda livre com resistência do meio.

#### 4.5. A lei de Stokes e a determinação da constante k

A equação da velocidade limite de um corpo em queda, equação (vi), contém uma constante  $k$ , cujo valor depende das propriedades do meio onde o corpo se move e também da geometria do corpo, isto é, sua forma e tamanho. A *lei de Stokes* pode ser usada para

determinar o valor da constante  $k$  para esferas rígidas que se movimentam em meio fluido infinito em regime laminar. Seus cálculos são trabalhosos, conforme destacam Alonso & Finn (1972). A lei de Stokes estabelece que para uma esfera de raio  $R$  a constante  $k$  é expressa como:

$$K = 6\pi R\eta \quad (\text{iv})$$

Nessa relação,  $\eta$  é o *coeficiente de viscosidade*, um atributo do meio fluido. Definiremos com maiores detalhes a viscosidade no Capítulo 5, Seção 5-4.

A lei de Stokes somente é válida para situações ideais: baixas velocidades e escoamento laminar de esferas rígidas. Nossa proposta de atividade trata uma situação real que não pode ser descrita exatamente por essa lei. Entretanto, essa lei pode ser usada como uma segunda<sup>1</sup> aproximação ao problema, pois ela fornece as relações entre as grandezas massa, diâmetro e viscosidade e a velocidade limite de um corpo esférico em queda, relações essas que retratam o ternário *inércia – geometria – fluido*, que são os elementos que afetam o fenômeno em toda a sua complexidade real.

Ao substituir a equação (ix) na equação (vi) obtêm-se a seguinte equação para a velocidade limite:

$$v_L = \frac{mg}{6\pi R\eta} \quad (\text{x})$$

De acordo com a equação (x) a velocidade limite de uma esfera em queda num meio viscoso depende diretamente da massa  $m$  da esfera e depende inversamente do raio  $R$  e da viscosidade  $\eta$  do meio. No próximo capítulo analisaremos FEDs de corpos esféricos em queda através de meios viscosos e com essa técnica construiremos um modelo que consiste em uma segunda aproximação ao problema da queda, utilizando como estratégia a análise de gráficos  $v \times t$ , com controle de grandezas.

## Capítulo 5

### Estudo da queda dos corpos: proposta de atividades

Neste capítulo são descritas as etapas de preparação da experiência para a filmagem da queda das esferas e a produção das fotografias estroboscópicas. O objetivo, como foi comentado em capítulos anteriores, é mostrar como é possível utilizar as FED para desenvolver aulas ‘experimentais’ nas quais podemos levar o aluno a construir uma relação funcional entre a velocidade limite, o diâmetro e a massa da esfera, e também entre a velocidade limite e a viscosidade do meio. Para isso foram realizados dois grupos de experimentos: um com esferas de isopor em queda no ar, para verificar a relação entre velocidade limite, massa e raio das esferas; outro com esferas de aço em queda numa proveta preenchida com alguns fluidos de viscosidades diferentes, para verificar a relação entre a velocidade limite e a viscosidade.

Na atividade trabalharemos com o controle de grandezas. Portanto, para verificar a dependência da velocidade limite em relação à massa foram analisadas as fotografias de queda no ar de um conjunto de três esferas de mesmo diâmetro e massas diferentes; para verificar a dependência da velocidade limite com o raio da esfera foi analisado um conjunto de três fotografias de esferas da mesma massa e diâmetros diferentes.

A realização da experiência de queda de esferas de isopor com resistência do ar não é tarefa trivial. Nossas experiências mostraram que para se observar o regime de queda no ar em MRU é necessário um amplo cenário, neste caso um cenário externo com vários metros de extensão. Nessa situação, a qualidade da fotografia dependerá das condições ambientais, pois qualquer movimento leve do ar deflete a esfera em queda e, por outro lado, dias ensolarados podem gerar sombras indesejáveis na fotografia. A vantagem é aquela do testemunho fotográfico: uma vez que as fotografias estejam prontas, passam a fazer parte de um acervo permanente e podem ser usadas de forma ilimitada pelo professor.

Por fim são analisadas as quedas de uma pequena esfera de aço numa proveta em três meios diferentes: água, óleo e glicerina. Com isso será verificada a influência da viscosidade do meio na velocidade limite da esfera.

## 5.1. Programação da experiência de queda no ar

Para a melhor compreensão do desenvolvimento das experiências que geraram as fotografias estroboscópicas digitais das quedas no ar esta seção será dividida em três partes: preparação da experiência, realização e filmagem das quedas e análise dos dados a partir da fotografia estroboscópica digital.

### 5.1.1. Preparação da experiência

Como a experiência de queda no ar tem por objetivo verificar a relação entre a velocidade limite, o diâmetro e a massa da esfera, é necessário chamar atenção sobre alguns detalhes referentes à preparação das esferas:

- Para obter esferas de mesmo diâmetro e massas diferentes, foram utilizadas esferas de isopor. As esferas foram cortadas em dois hemisférios, esvaziadas e coladas novamente recompondo a forma original.
- Para esferas com mesma massa e diâmetros diferentes foi adotado o mesmo procedimento, entretanto houve um maior controle da quantidade de isopor retirada do interior das esferas para que as três ficassem com mesma massa, dentro da margem de erro da balança digital que é de  $\pm 0,1\text{g}$  (*Balança Diamond - Series A04*). A tabela a seguir apresenta as informações das esferas utilizadas:

**Tabela 1 - Dados das esferas**

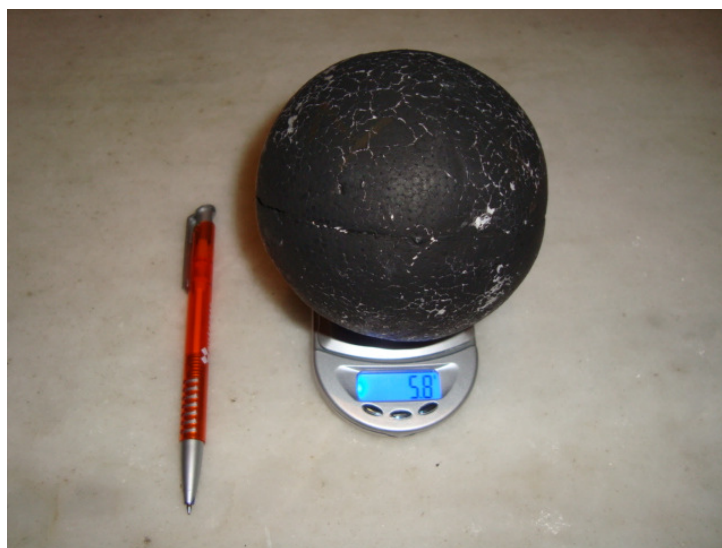
<b>Esfera</b>	<b>Massa (<math>\pm 0,1\text{ g}</math>)</b>	<b>Diâmetro (<math>\pm 0,5\text{ cm}</math>)</b>
1	8,4	12,7
2	8,5	10,4
3	8,5	7,6
4	5,8	10,4
5	18,5	10,4
6	38,3	10,4

A preparação do cenário para filmagem deve levar em consideração que o comprimento da trajetória deve ser tal que as esferas alcancem a velocidade limite, ou no mínimo, que seja possível observar a tendência à velocidade limite com relativa clareza. O cenário utilizado tem altura da ordem de 7 metros. Para proceder o enquadramento do cenário, a câmara fotográfica foi posicionada a uma distância da ordem de 10 metros da trajetória de queda da esfera.

Outra observação é relacionada à qualidade da fotografia estroboscópica digital. Basicamente a maior preocupação é em relação à iluminação e ao contraste. Um fundo branco foi conseguido utilizando uma tela de papel obtida colando-se uma sequência de folhas brancas (Figura 10). Esse fundo permite uma boa iluminação e um bom contraste com as esferas em movimento, todas as quais foram pintadas de preto (Figura 11).



**Figura 10** - Cenário utilizado para a realização da filmagem. Para conseguir o fundo branco foi colada com fita uma sequência de folhas de papel cartão brancas. Nessa foto a câmara está a 10 m da cortina.



**Figura 11-** Uma esfera de isopor oca com diâmetro da ordem de 10 cm e massa de 5,8 g, verificada com uma micro balança digital.

É necessário que a filmagem seja feita num dia nublado, quando a luz fica difusa, o que impede a formação de sombras. É também necessário evitar o efeito do vento, pois devido à pequena massa da esfera a menor brisa interfere na realização da experiência.

### **5.1.2. Produção das fotografias estroboscópicas digitais**

A filmagem foi realizada com uma câmara fotográfica Cyber-Shot DSC-W120 da Sony que possui recurso de filmagem. A câmara foi colocada sobre um tripé e posicionada de frente à trajetória de tal forma que o plano frontal da câmara ficasse paralelo ao plano na trajetória da esfera. Com isso pretendeu-se diminuir os erros por paralaxe. A configuração inserida na câmara foi para que o filme fosse realizado no modo *Fine*, que filma 30 quadros por segundo, com cada quadro no formato 640 x 480 pixels.

A técnica de tratamento do vídeo e produção da fotografia utilizada foi a sugerida por Dias, Amorim e Barros (2009), a qual faz uso de dois softwares de acesso gratuito disponíveis na internet: o *VirtualDub* que transforma a sequência de vídeo num conjunto de fotogramas, e o *ImageJ*, que superpõe os fotogramas produzindo a fotografia estroboscópica digital.

Maiores detalhes da produção de fotografias estroboscópicas digitais se encontram no Anexo.



### 5.1.3. Análise das fotografias estroboscópicas

Para análise das fotografias foi realizado um tratamento da imagem com o auxílio do *ImageJ*. O trecho de movimento a ser analisado foi selecionado e recortado da fotografia. O trecho foi ampliado com um recurso de escala do programa que está disponível na janela *image* → *scale* e em seguida foi usado um recurso que transformou a fotografia numa imagem binária, ou seja, preta e branca, que está disponível na janela *process* → *binary* → *make binary*.

Para que fosse possível determinar um valor experimental da velocidade num sistema de unidades conhecido, o sistema CGS em nosso caso, foram inseridos fatores de conversão dos valores lidos na própria fotografia para o valor real. Para essa calibração foi utilizada a largura da tela de papel que é conhecida ( $2,00 \pm 0,01$ ) m. Com isso o fator de escala de cada fotografia foi determinado e impresso na mesma usando recursos de desenho do *ImageJ*. A imagem assim preparada foi impressa em papel formato A4 como mostrado na Figura 12. Na lateral da figura vemos o traço de calibração. Nesse caso, o traço tem aproximadamente 5 cm e corresponde ao comprimento real de 1 m.

Após os passos acima descritos a fotografia foi impressa e as medidas realizadas com o auxílio de uma régua escolar, graduada em milímetros (Figura 12). Os dados foram anotados na própria folha impressa e depois transferidos para o computador. Através do programa *Origin 8*, foram construídos os gráficos e ajustadas as curvas pelo método dos mínimos quadrados. Para o ajuste foi necessário inserir a função que representa a equação (vii), função não linear e que não está disponível no banco de dados do programa.

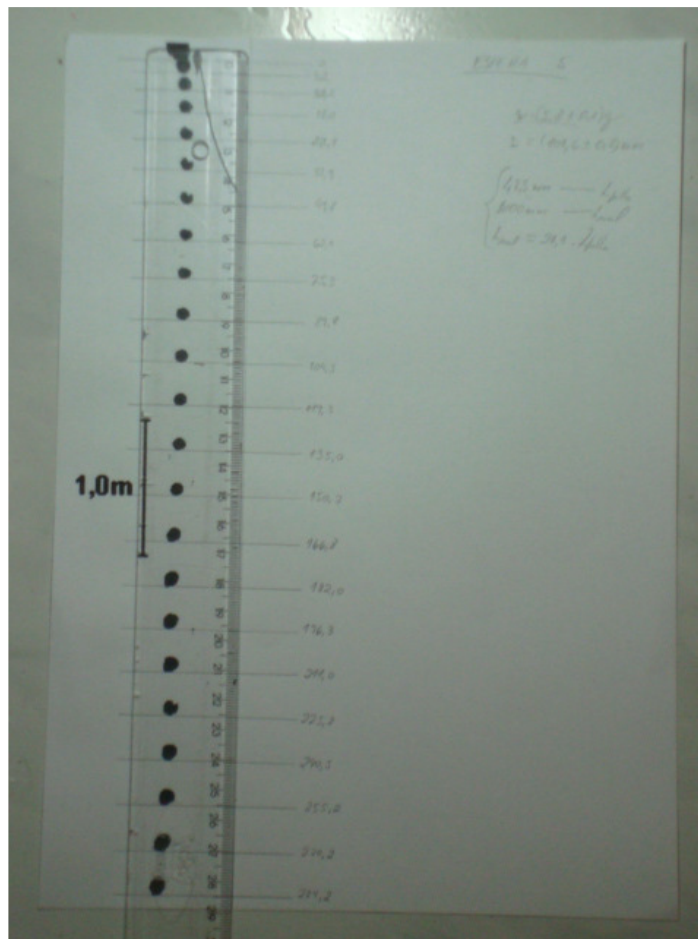


Figura 12 - Fotografia estroboscópica de uma esfera oca de isopor transformada numa imagem binária com auxílio do programa *ImageJ*. As posições foram medidas com o auxílio de uma régua escolar a partir de uma reta tangente à esfera no ponto inferior em cada instante, marcadas na Figura em lápis. Observe que na figura há um comprimento da ordem de 5 cm que corresponde ao valor real de 1 m.

## 5.2. Análise da queda no ar das esferas de mesma massa e diâmetro diferente

Nessa experiência estamos controlando a massa das três esferas, e fazendo variar os seus diâmetros. Além disso, é importante ressaltar que a viscosidade do meio também permanece constante, pois a filmagem foi feita com as esferas caindo uma após a outra. Com isso iremos verificar o comportamento da velocidade limite em relação ao diâmetro das esferas mantendo-se a massa fixa. Os dados de posição e velocidade apresentam um erro percentual de 2%.

## EXPERIÊNCIA I – QUEDA DA ESFERA 1

Como mostra a Tabela 2 e o gráfico da Figura 13, a velocidade limite alcançada pela esfera foi de  $(499,2 \pm 1,0)$ cm/s. O valor determinado pelo *Origin 8* através do método dos mínimos quadrados foi de  $(507 \pm 8)$  cm/s.

**Tabela 2 - Dados de posição, tempo e velocidade da queda da esfera 1.**

<b>Tempo x(1/15)s</b>	<b>Posição (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>
0	0,0	0,0
1	12,5	187,2
2	28,1	234,0
3	46,8	280,8
4	68,6	327,6
5	92,6	358,8
6	118,6	390,0
7	145,6	405,6
8	173,7	421,2
9	202,8	436,8
10	231,9	436,8
11	260,0	421,2
12	290,2	452,4
13	321,4	468,0
14	353,6	483,6
15	384,8	468,0
16	418,1	499,2
17	451,4	499,2
18	484,6	499,2
19	517,9	499,2

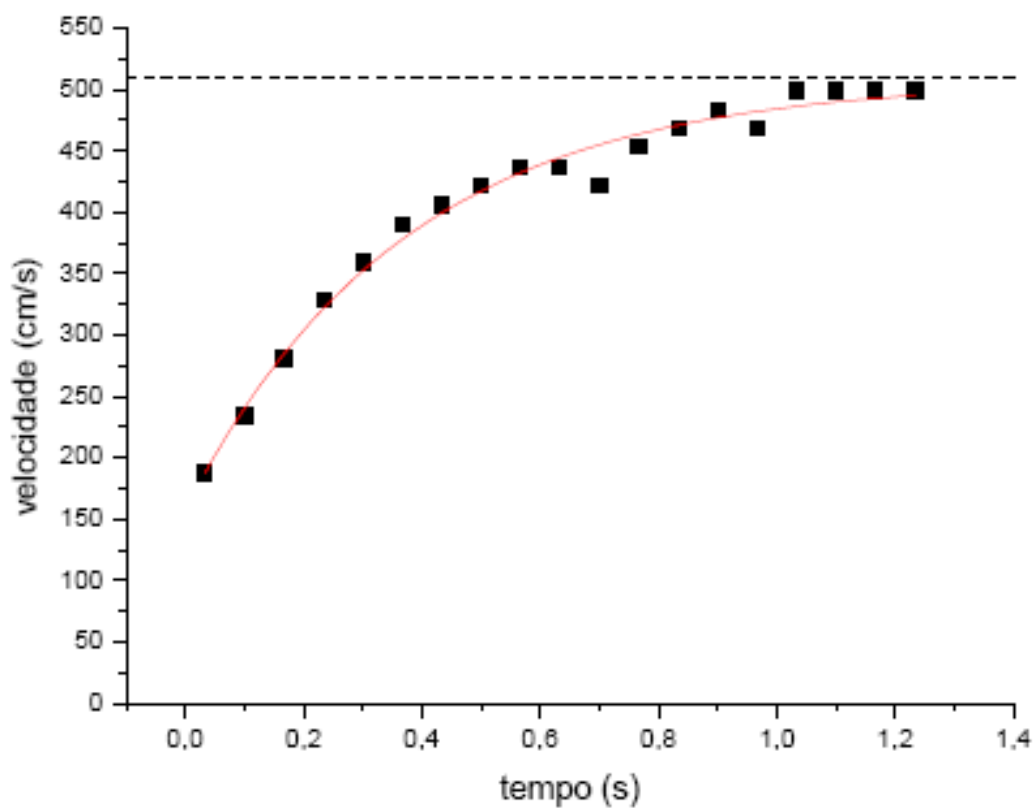


Figura 13 - Representação da velocidade em função do tempo da queda no ar da esfera 1.

## EXPERIÊNCIA II – QUEDA DA ESFERA 2

Como mostra a Tabela 3 e o gráfico da Figura 14, a velocidade limite atingida pela esfera foi  $(566,1 \pm 1,0)$  cm/s. O valor determinado pelo programa *Origin 8* através do método dos mínimos quadrados foi de  $(603 \pm 11)$  cm/s.

**Tabela 3 - Dados de posição, tempo e velocidade da queda da esfera 2**

<b>Tempo x(1/15)s</b>	<b>Posição (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>
0	0,0	0,0
1	11,2	168,3
2	26,5	229,5
3	44,9	275,4
4	66,3	321,3
5	89,8	351,9
6	118,3	428,4
7	146,9	428,4
8	177,5	459,0
9	210,1	489,6
10	244,8	520,2
11	279,5	520,2
12	316,2	550,8
13	353,9	566,1
14	391,7	566,1
15	429,4	566,1
16	466,1	550,8
17	503,9	566,1
18	541,6	566,1
19	579,4	566,1

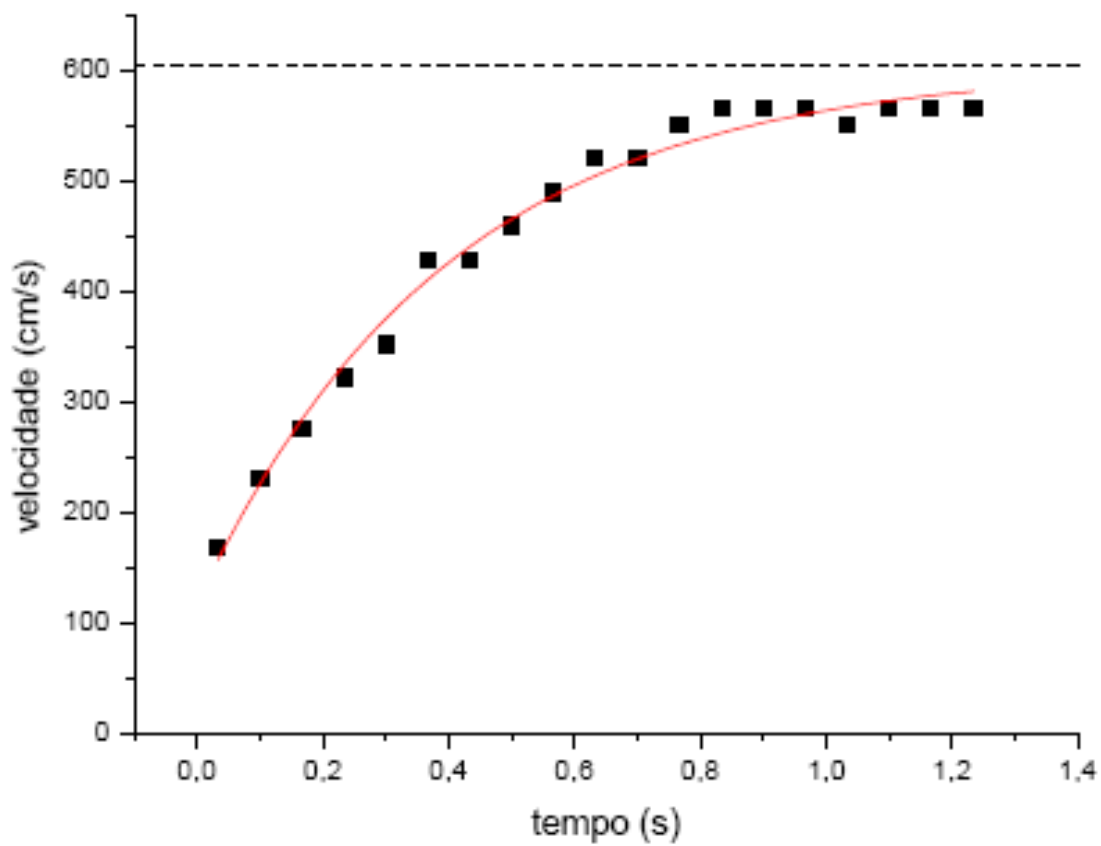


Figura 14 - Representação da velocidade em função do tempo da queda no ar da esfera 2.

### EXPERIÊNCIA III – QUEDA DA ESFERA 3

Como mostra o gráfico da Figura 15, a velocidade limite, determinada através do programa *Origin 8*, da esfera 3 foi de  $(882 \pm 20)$  cm/s.

**Tabela 4 - Dados de posição, tempo e velocidade da queda da esfera 3**

<b>Tempo x(1/15)s</b>	<b>Posição (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>
0	0,0	0,0
1	12,0	180,0
2	29,0	255,0
3	50,0	315,0
4	75,0	375,0
5	103,0	420,0
6	134,0	465,0
7	168,0	510,0
8	204,0	540,0
9	244,0	600,0
10	284,0	600,0
11	327,0	645,0
12	372,0	675,0
13	418,0	690,0
14	465,0	705,0
15	513,0	720,0
16	562,0	735,0

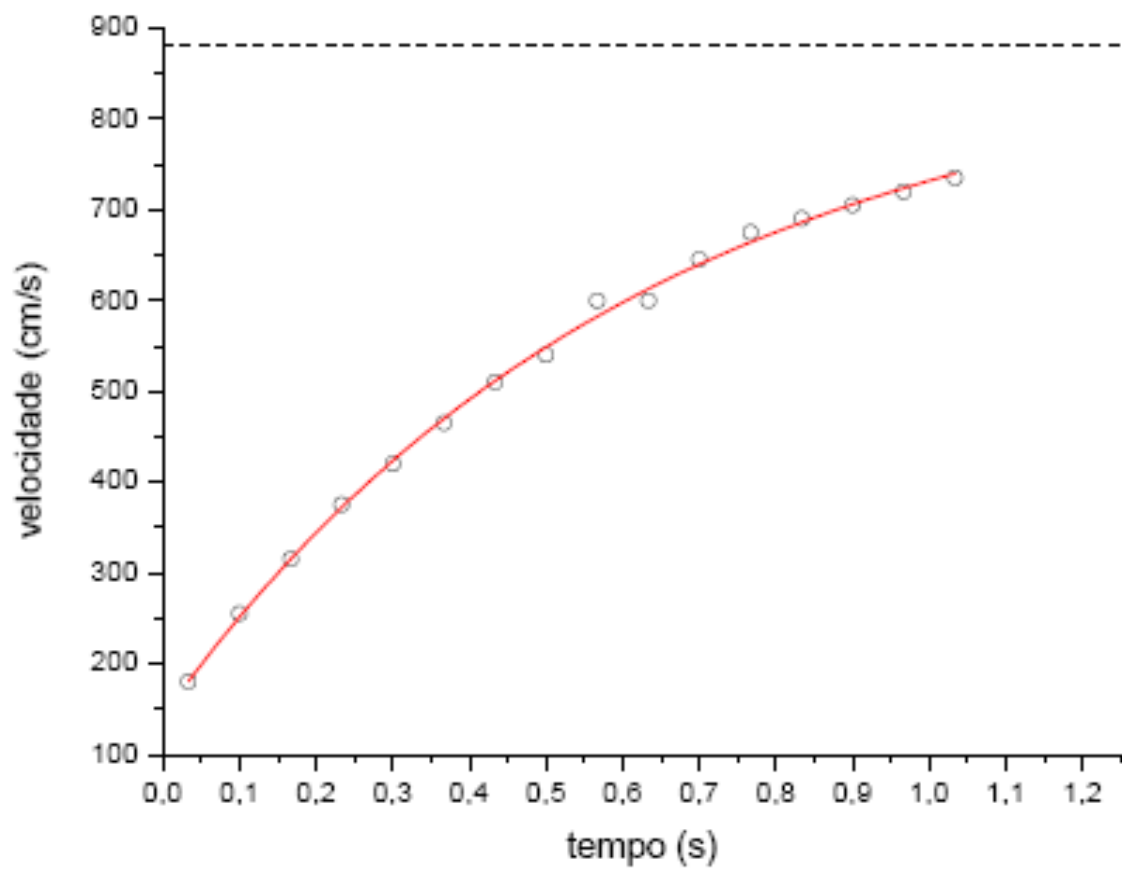


Figura 15 - Representação da velocidade em função do tempo da queda no ar da esfera 3.



### 5.2.1. Resultados da queda de esferas de mesma massa e diâmetros diferentes em queda no ar

A Figura 16 reúne os gráficos dos três movimentos num único plano de eixos coordenados:

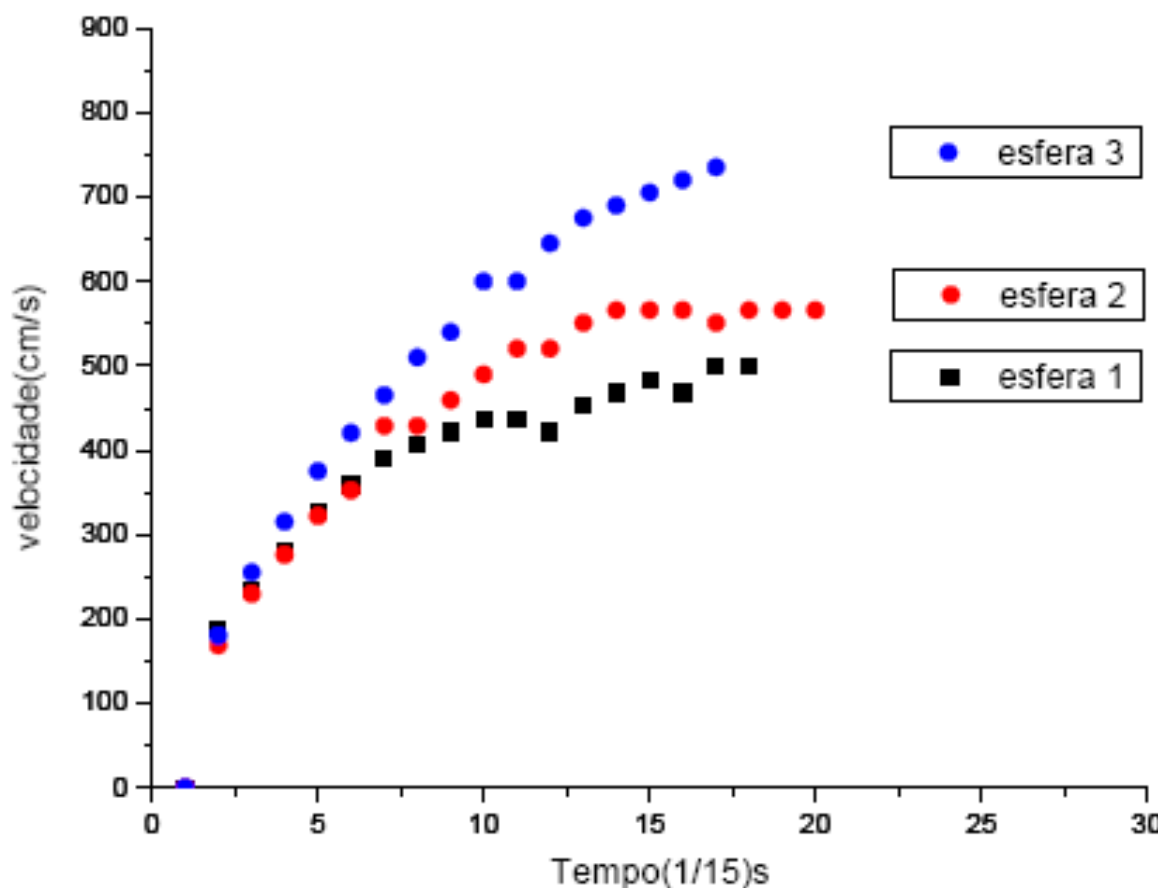


Figura 16 – Representação da velocidade limite das esferas de mesma massa e diâmetro diferente  $D_1 > D_2 > D_3$ .

Pode-se verificar através dos gráficos e das tabelas que conforme os diâmetros das esferas diminuem, as velocidades limites aumentam. Para a esfera de maior diâmetro a velocidade limite obtida através do método dos mínimos quadrados com auxílio do programa *Origin* foi de  $(507 \pm 8)$  cm/s, enquanto que para a esfera de menor diâmetro esse valor sequer é alcançado com clareza: através do método dos mínimos quadrados feito com auxílio do *Origin* o seu valor determinado em  $(882 \pm 20)$  cm/s.

### 5.3. Análise da queda no ar de esferas de mesmo diâmetro e massa diferente

Nesta seção apresentamos os resultados obtidos para as três esferas de diâmetros iguais e massas diferentes. Com isso verificamos a relação que existe entre a velocidade limite e a massa.

#### EXPERIÊNCIA IV – QUEDA DA ESFERA 4

Como mostra o gráfico da Figura 17, a velocidade limite, determinada através do programa *Origin 8*, da esfera 4 foi de  $(476 \pm 8)$  cm/s.

**Tabela 5 - Dados de posição, tempo e velocidade da queda da esfera 4.**

<b>Tempo x(1/15)s</b>	<b>Posição (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>
0	0,0	0,0
1	12,4	185,4
2	28,8	247,2
3	47,4	278,1
4	70,0	339,9
5	94,8	370,8
6	121,5	401,7
7	148,3	401,7
8	178,2	448,1
9	209,1	463,5
10	241,0	479,0
11	273,0	479,0
12	305,9	494,4
13	338,9	494,4
14	370,8	479,0
15	401,7	463,5
16	431,6	448,0
17	461,4	448,1
18	494,4	494,4
19	524,3	448,0
20	556,2	479,0
21	585,0	432,6

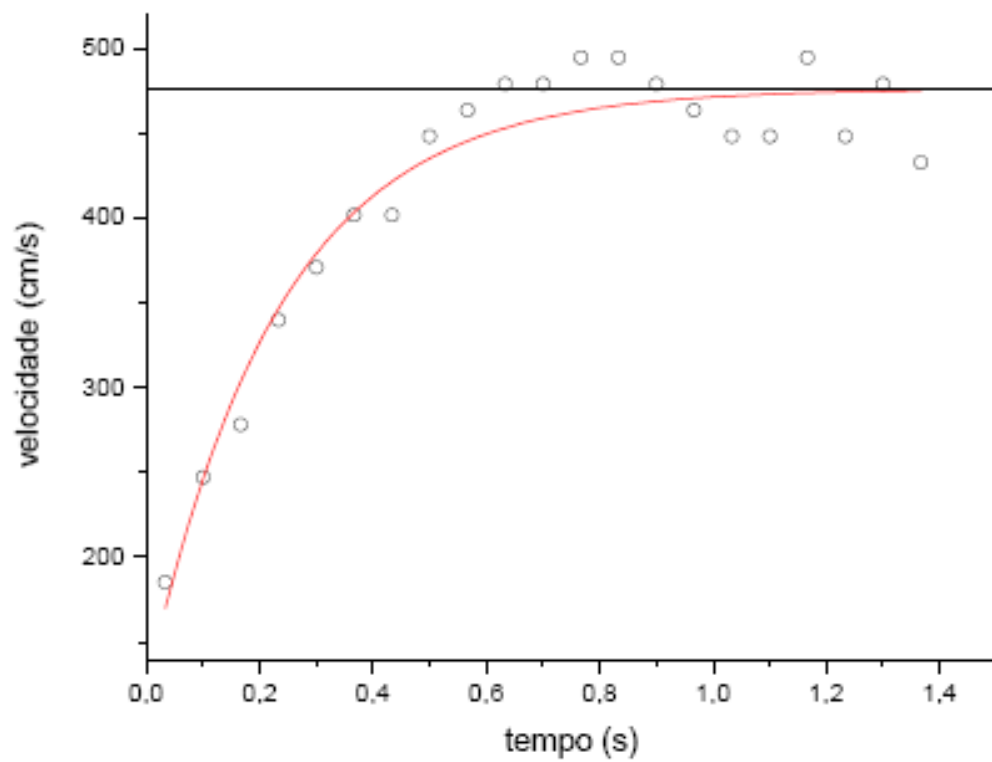


Figura 17 - Representação da velocidade em função do tempo da queda no ar da esfera 5.

## EXPERIÊNCIA V – QUEDA DA ESFERA 5

Como mostra o gráfico da Figura 18, a velocidade limite, determinada através do programa *Origin 8*, da esfera 5 foi de  $(996 \pm 39)$  cm/s.

**Tabela 6 - Dados de posição, tempo e velocidade da queda da esfera 5.**

<b>Tempo x(1/15)s</b>	<b>Posição (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>
0	0,0	0,0
1	12,4	185,4
2	28,8	247,2
3	49,4	309,0
4	74,2	370,8
5	103,0	432,6
6	133,9	463,5
7	167,9	509,9
8	207,0	587,1
9	247,2	602,6
10	289,4	633,5
11	333,7	664,4
12	381,1	710,7
13	428,5	710,7
14	479,0	757,1
15	530,5	772,5
16	582,0	772,5

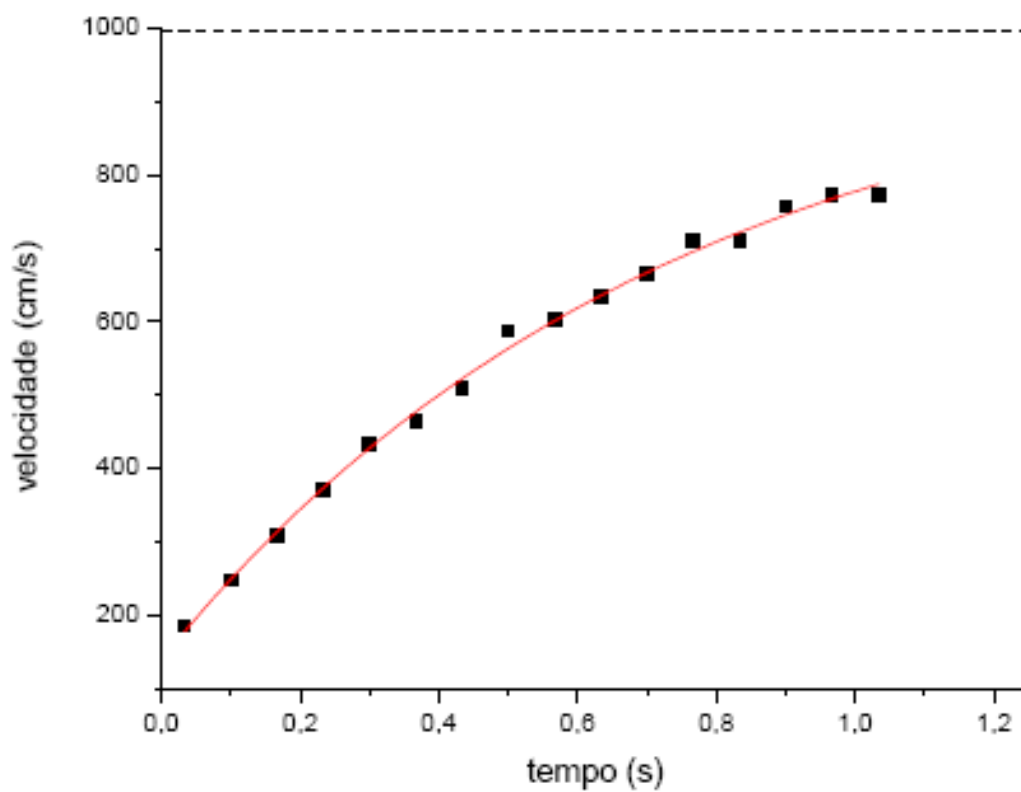


Figura 18 – Representação da velocidade em função do tempo da queda no ar da esfera 5.

## EXPERIÊNCIA VI – QUEDA DA ESFERA 6

Como mostra o gráfico da Figura 19, a velocidade limite, determinada através do programa *Origin 8*, da esfera 5 foi de  $(1690 \pm 304)$  cm/s.

**Tabela 7 - Dados de posição e tempo da queda da esfera 6.**

<b>Tempo x(1/15)s</b>	<b>Posição (cm)</b>	<b>Velocidade (cm/s)</b>
0	0,0	0,0
1	11,6	174,1
2	27,4	237,4
3	46,4	284,9
4	74,9	427,3
5	104,4	443,1
6	138,2	506,4
7	173,0	522,2
8	217,3	664,7
9	262,7	680,5
10	311,2	728,0
11	362,9	775,4
12	417,8	822,9
13	476,9	886,2
14	535,9	886,2
15	599,2	949,5

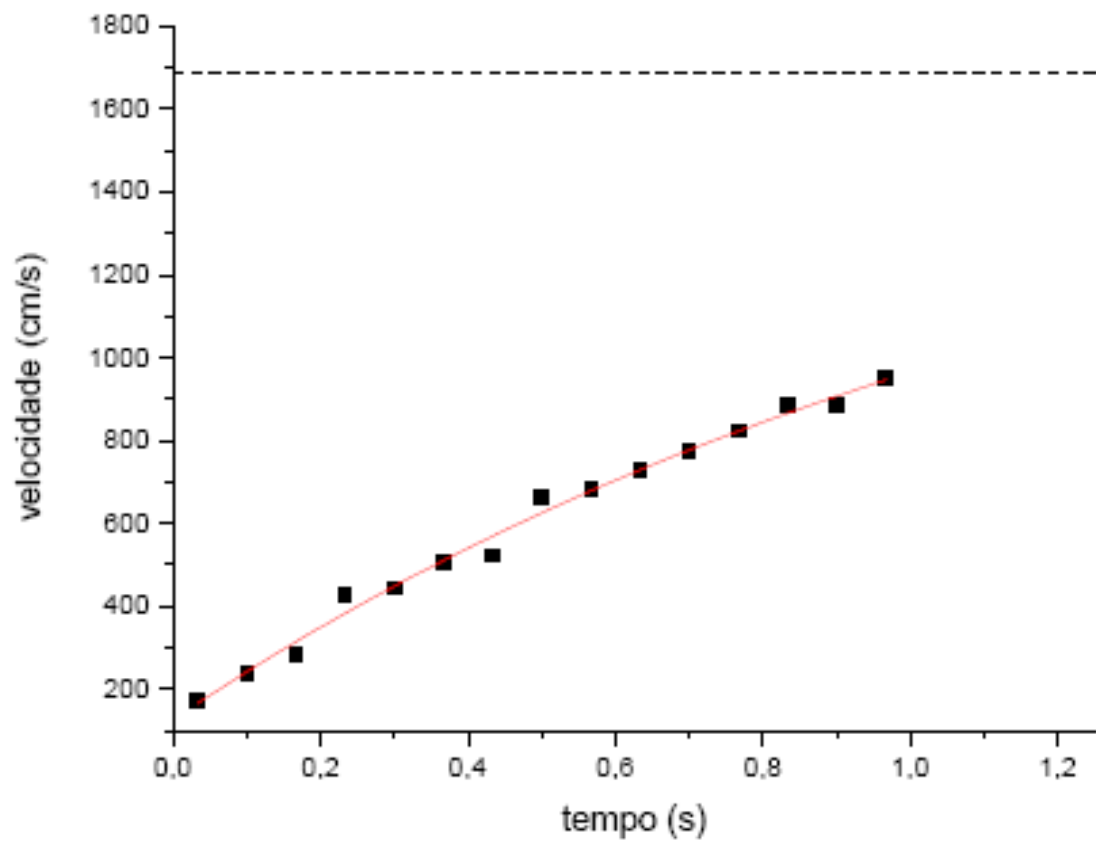


Figura 19 - Representação da velocidade em função do tempo da queda no ar da esfera 6.

### 5.3.1. Resultados obtidos para as esferas de mesmo diâmetro e massas diferentes em queda no ar

A Figura 20 mostra os gráficos dos três movimentos num único plano de eixos coordenados:

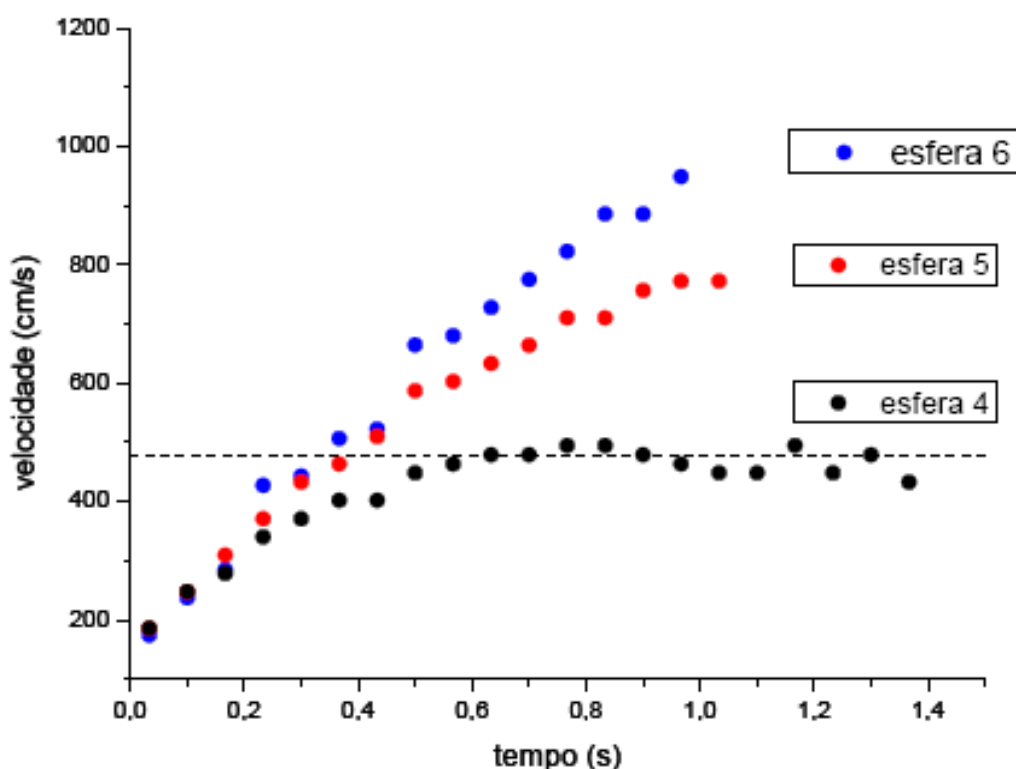


Figura 20 – Representação da velocidade limite das esferas de mesmo diâmetro e massa diferente  $m_4 < m_5 < m_6$ .

Pode-se verificar através dos gráficos e das tabelas desta Seção que quanto maior a massa da esfera em queda maior é a velocidade limite alcançada. Para a esfera de menor massa a velocidade limite alcançada foi da ordem de 450 cm/s, e para a esfera de maior massa esse valor sequer é possível de ser extrapolado com confiabilidade. Pode-se verificar também que quanto maior for a massa da esfera mais próximo do movimento de queda livre ideal ela se aproxima.

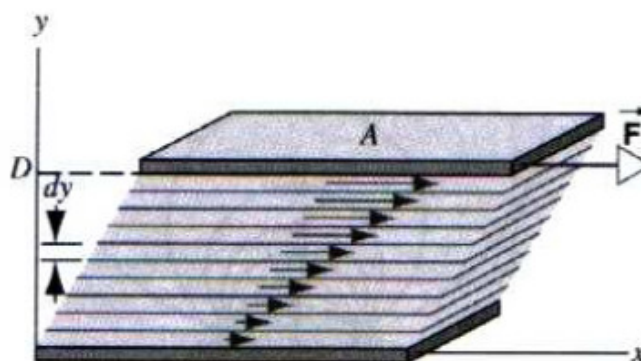


## 5.4. A influência da viscosidade do meio na velocidade limite de esferas em queda

Outro fator importante na determinação da velocidade limite  $v_L$  é a viscosidade  $\eta$  do meio. É impraticável verificar a relação entre as grandezas velocidade limite e viscosidade do meio com esferas caindo no ar. Mas, com o mesmo recurso de produção de fotografias estroboscópicas digitais, podem-se abandonar pequenas esferas de aço dentro de tubos cilíndricos contendo líquidos de diferentes viscosidades. Essa experiência é de mais fácil execução do que a experiência das esferas em queda no ar. Por isso, caso o professor queira, ela pode ser reproduzida em sala de aula, filmada e, por fim, transformada numa fotografia estroboscópica, tudo com a participação da turma.

Como se trata de um experimento no qual variamos a viscosidade do meio, é importante uma breve explanação sobre o que é viscosidade. Podemos usar o conceito de viscosidade descrito no texto de Física 2 do Halliday (RESNICK et al, 2007). Esse autor coloca que a viscosidade no escoamento de um fluido é análoga ao atrito no movimento dos sólidos:

*Quando um sólido é movimentado sobre outro, deve-se aplicar uma força externa  $F$  para vencer a força de atrito  $f$  caso se deseje manter o corpo com velocidade constante. No caso do movimento de um fluido, pode-se considera-lo entre duas placas paralelas (ver figura X). A força  $F$  é aplicada à placa superior de forma que ela adquira um movimento com velocidade constante  $v$  em relação à placa inferior, a qual admite-se estar em repouso. A força  $F$  se opõe à força de arrasto viscosa gerada na placa superior para que seja mantida com velocidade constante. Pode-se idealizar o fluido como sendo dividido em camadas paralelas às placas. A viscosidade atua não apenas entre o fluido e a placa, mas também entre as diversas camadas do fluido. A velocidade de cada camada difere de uma quantidade  $dv$  em relação às camadas adjacentes (...) admite-se que a camada superior do fluido possui a mesma velocidade  $v$  da placa superior e que a camada inferior do fluido possui a mesma velocidade da placa inferior, ou seja, zero. (RESNICK et al, 2007)*



**Figura 21 –** Representação de um fluido viscoso entre duas placas paralelas. Quando a placa superior é puxada por uma força  $F$  que a coloca em velocidade constante  $v$ , o fluido entra num regime de velocidades como se fosse constituído por um número finito de camadas. Cada camada se movimenta com uma velocidade constituindo um Gradiente de Velocidades. (RESNICK et al, 2007 – agradecemos à LTC editora)

A viscosidade do fluido surge do fato de que a força  $F$  necessária para produzir o movimento uniforme da placa é proporcional à área  $A$  da placa; Essa força também é proporcional ao gradiente de velocidade  $dv/dy$ . Com isso,  $F$  é dado por:

$$F = \eta A \frac{dv}{dy}$$

onde  $\eta$  é uma constante de proporcionalidade chamada de coeficiente de viscosidade ou simplesmente viscosidade.

A unidade de medida da viscosidade no SI é o  $N.s/m^2$ . No sistema CGS a unidade é o  $dyn.s/cm^2$  e é chamada de *poise* em homenagem ao físico francês *Jean-Louis-Marie Poiseuille* (1799-1869) que foi o primeiro a investigar o fenômeno com o objetivo de entender a circulação sanguínea.

Na realidade, o fato de o movimento dos corpos ocorrer em meio viscoso é que faz com que eles atinjam uma velocidade limite, ou seja, é a viscosidade do meio que produz o problema abordado neste trabalho.

Entretanto devemos sinalizar que o fenômeno da viscosidade de um meio é um problema complexo e que depende de diversos fatores, como a temperatura, a pressão, o estado físico e a composição química do meio. Na próxima seção iremos analisar a queda de pequenas esferas metálicas com diâmetro de  $(5,00 \pm 0,05)$  mm dentro de uma proveta de diâmetro  $(60,0 \pm 0,5)$  mm através de três meios líquidos: a água, o óleo de soja e a glicerina. Existem muitas tabelas com valores de viscosidade disponíveis nos livros e na internet para os fluidos utilizados. Entretanto a maioria delas é feita em condições

específicas de temperatura e pressão que diferem das condições dos nossos experimentos, e por isso não podem ser utilizadas para, por exemplo, servirem de comparação com os resultados aqui obtidos.

**Tabela 8 - Coeficientes de viscosidade da água, do ar e de outras substâncias para diferentes temperaturas.**

Líquidos			Gases		
Substância	Temperatura	( $\eta \times 10^{-2}P$ )	Substância	Temperatura	( $\eta \times 10^{-4}P$ )
Água	0°C	1,792	Ar	0°C	1,71
Água	20°C	1,005	Ar	20°C	1,81
Água	40°C	0,656	Ar	40°C	1,90
Glicerina	20°C	833	Hidrogênio	20°C	0,93
Álcool	20°C	0,367	Amônia	20°C	0,97

Fonte: Alonso & Finn (1972)

### 5.5. Experiência da queda de uma pequena esfera de aço em três meios diferentes

Através da experiência sensorial sabemos que a viscosidade é alta para os fluidos que escoam lentamente e baixa para os fluidos que escoam rapidamente. Por isso podemos ordenar em ordem crescente as viscosidades dos fluidos usados, mesmo sem atribuir valores para elas: viscosidade baixa - água, viscosidade intermediária - óleo, viscosidade alta - glicerina.

É importante destacar que no experimento de queda das esferas no tubo com líquido a lei de Stokes não é rigorosamente observada. Na realidade a lei de Stokes somente é válida para situações ideais onde esferas perfeitas se movimentam em meios fluidos onde não haja paredes, isto é, um meio infinito, e que o fluxo seja laminar. Por isso essa lei deve ser tomada com reserva. Não obstante o caráter aproximativo da lei de Stokes, podemos usá-la como segunda aproximação ao problema, pois, como já mencionamos, ela fornece os elementos conceituais essenciais explorados na proposta didática deste trabalho, ou seja, as relações entre as grandezas massa da esfera, diâmetro da esfera e viscosidade do meio quanto à velocidade limite.

A experiência foi feita numa proveta graduada, e para que a influência da parede fosse minimizada utilizamos uma esfera de diâmetro muito menor que o diâmetro do tubo e os lançamentos foram feitos respeitando-se o eixo central do tubo. A Figura 22(a) mostra o aparato experimental utilizado. No curso dos testes, verificamos que o lançamento manual das esferas no tubo com fluido introduzia várias instabilidades: o movimento ora não seguia uma trajetória retilínea, ora a trajetória perdia a centralidade tendendo para as laterais do tubo. Vimos que o resultado era fortemente dependente de pequenas variações nas condições de lançamento, condições essas muito difíceis de serem reguladas com as mãos. Foi necessário então colocar uma tampa furada no centro por onde se carregava as esferas para lançamento (Figura 22(b)). Um parafuso com uma lâmina na extremidade retinha a esfera e o lançamento era feito rodando o parafuso, isto é, desobstruindo a saída do furo.

Nesta etapa do trabalho não foram realizadas as conversões das unidades arbitrárias da fotografia (*pixel*) para os valores reais (cm), conforme o que foi feito e exemplificado com os dados das esferas de isopor em queda no ar. Essa é outra forma de analisar os dados, que consiste em fazer as medidas da posição através de réguas virtuais do próprio programa *ImageJ* (DIAS et al, 2009). Com a fotografia digital aberta na tela do programa coloca-se o cursor sobre a posição da esfera e verifica-se a coordenada em *pixel* daquela posição. Com isso a velocidade de cada esfera é medida em *pixels/s*. Caso se queira determinar a velocidade em valores reais ou caso se queira comparar as velocidades obtidas em diferentes fotografias (diferentes distâncias entre a trajetória e a câmara), pode-se usar o diâmetro do cilindro ( $60,0 \pm 0,5$ ) mm como fator de conversão de escala.



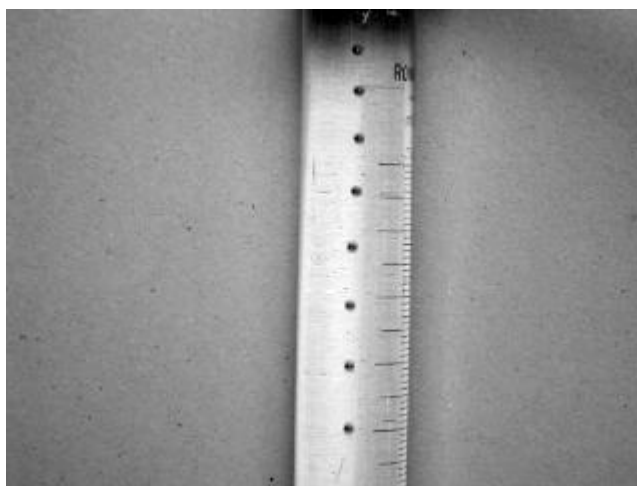
**Figura 22(a) - Sistema experimental para queda de esferas em diferentes meios fluidos.**



**Figura 22(b) – Detalhe da tampa de lançamento das esferas. Esse recurso foi importante para se obter trajetórias retilíneas e centralizadas facilitando a reprodutibilidade dos lançamentos.**

### EXPERIÊNCIA VII – QUEDA DA ESFERA DE AÇO NO TUBO CONTENDO ÁGUA

Como mostra o gráfico da Figura 24, a velocidade limite da esfera em queda através da água, determinada via método dos mínimos quadrados com auxílio do programa *Origin 8*, foi de  $(991 \pm 30)$  *pixels*.



**Figura 23 - Fotografia estroboscópica de uma pequena esfera em queda através da água.**

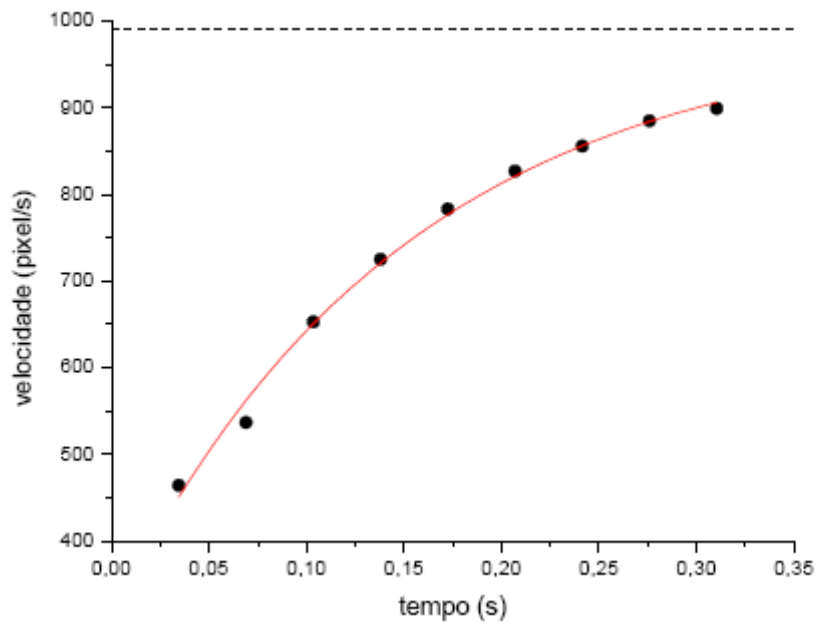


Figura 24 - Representação da velocidade limite em queda através da água

### EXPERIÊNCIA VIII – QUEDA DA ESFERA DE AÇO NO TUBO CONTENDO ÓLEO DE SOJA

Como mostra o gráfico da Figura 26, a velocidade limite da esfera em queda através do óleo de soja determinada com o programa *Origin 8* foi de  $(414 \pm 4)$  *pixel/s*.

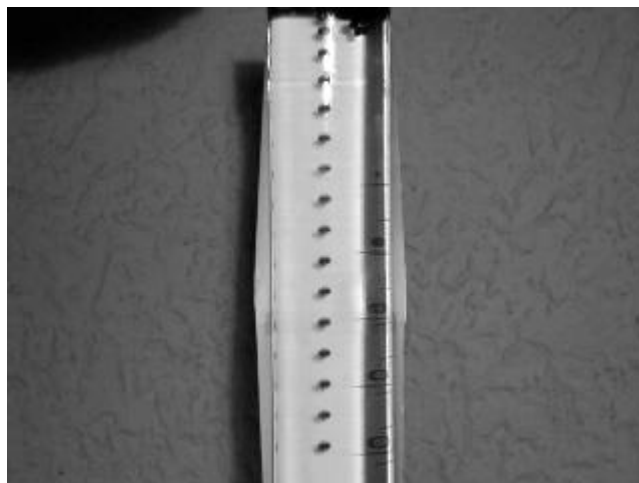
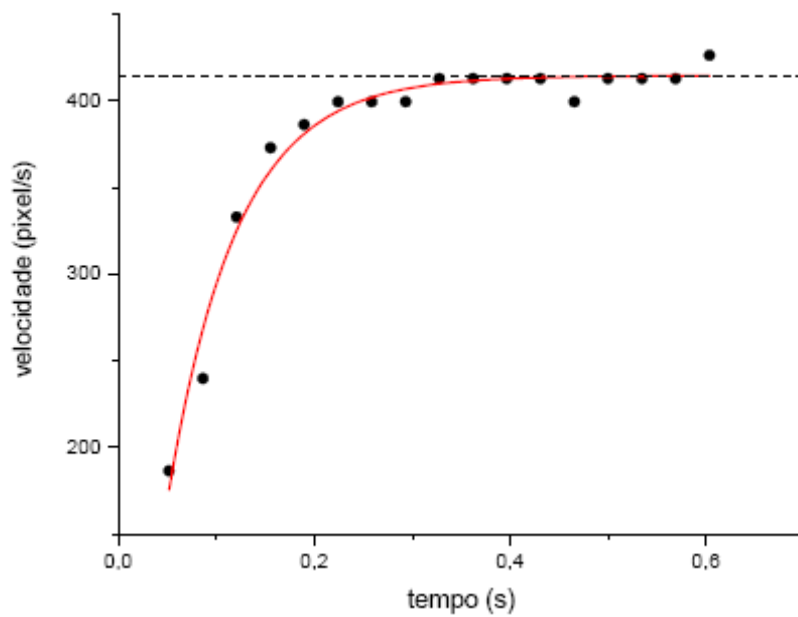


Figura 25 - Fotografia estroboscópica de uma esfera caindo através do óleo.



**Figura 26:** gráfico da velocidade limite de uma esfera caindo através do óleo

### EXPERIÊNCIA IX – QUEDA DA ESFERA DE AÇO NO TUBO CONTENDO GLICERINA

Como mostra o gráfico da Figura 28, a velocidade limite da esfera em queda através da glicerina determinada através com o programa *Origin 8* foi de  $(89 \pm 5)$  *pixells*.



**Figura 27 -** Fotografia estroboscópica de uma esfera caindo através da glicerina.

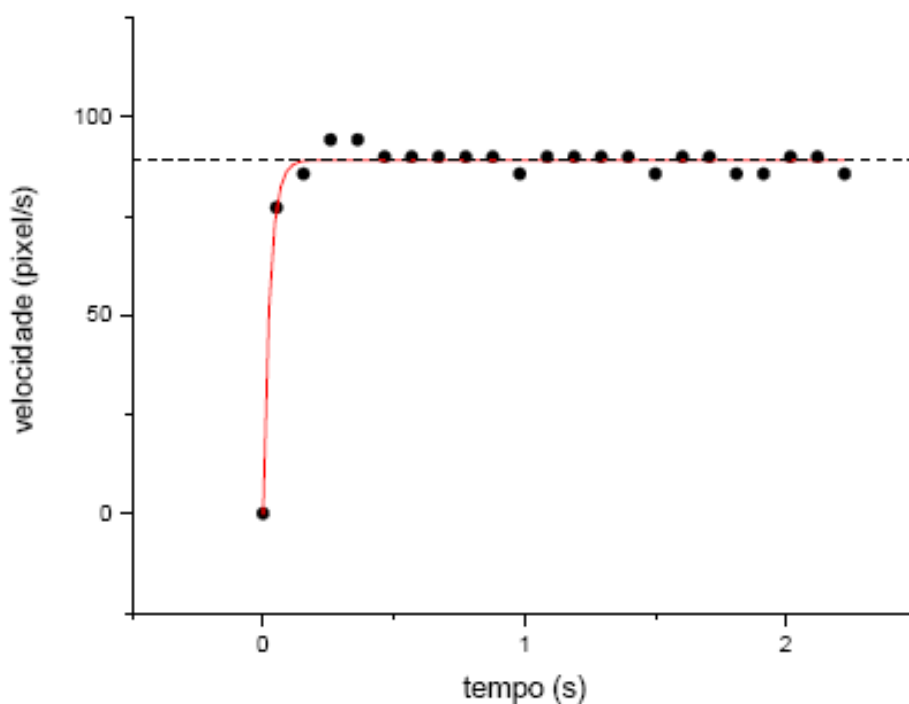


Figura 28 - Representação da velocidade limite de uma esfera caindo através da glicerina.

### 5.5.1. Discussão dos resultados obtidos com esferas de aço caindo através de meios com diferentes viscosidades

É importante ressaltar que os valores obtidos estão em unidades arbitrárias, porém estão normalizados, o que foi feito graças ao fato de o diâmetro do tubo ser conhecido. Como verificamos, ao aumentar a viscosidade do meio a velocidade limite da esfera diminuiu, o que concorda com o nosso modelo teórico. A Tabela 9 reúne as informações dos três experimentos:

**Tabela 9 - Velocidades limites da esfera de aço em meios viscosos.**

Meio viscoso	Velocidade limite (pixel/s)
Água	$991 \pm 30$
Óleo de soja	$414 \pm 4$
Glicerina	$89 \pm 5$



## 5.6. Considerações finais

Neste trabalho buscamos mostrar o potencial dos dados experimentais obtidos com análise das FEDs. Essa técnica permite o desenvolvimento de atividades onde os alunos podem interagir com o fenômeno estudado, construir tabelas e gráficos, buscar regularidades, comparar resultados, controlar grandezas, ou seja, trabalhar de forma *quase experimental*. Utilizamos como exemplo o estudo da queda dos corpos, mas a técnica pode ser utilizada para estudar qualquer tipo de movimento que possa ser filmado com uma câmara amadora.

Pudemos verificar que a impressão de uma FED em papel A4 é uma boa técnica de aplicação em sala de aula de uma estratégia que permita unir a teoria à prática. Entretanto, a impressão da fotografia pode ser substituída pela análise no próprio PC. Se trata de mais um recurso do *ImageJ*, a possibilidade de utilizar uma régua virtual (DIAS et al, 2009). Colocando-se o cursor sobre a posição da esfera obtém-se as coordenadas, em *pixel*, da posição, conforme destaque na Figura 29.

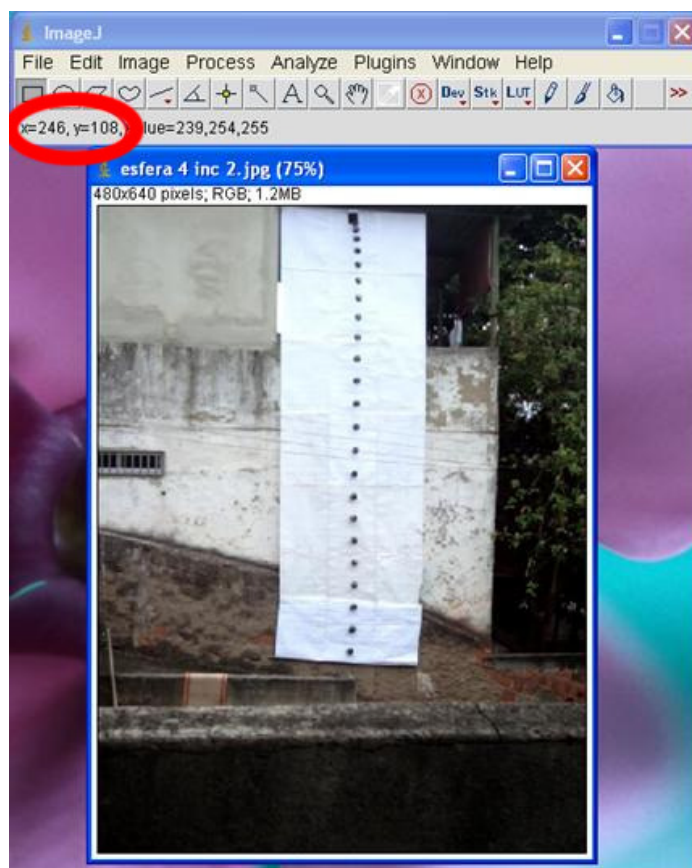


Figura 29 - O programa *ImageJ* informa as coordenadas em *pixel* do cursor. Nessa figura o cursor (que não aparece) estava na posição  $x = 246 \text{ pixel}$  e  $y = 108 \text{ pixel}$ , conforme verifica-se destacado pela elipse vermelha.

Esses dados podem ser inseridos em uma planilha do *Excel*, um programa bastante difundido nos PCs, e com isso construídos os gráficos.

Acreditamos que as FEDs constituem um material potencialmente significativo para o aprendizado. Com a técnica de produção o professor pode desenvolver um acervo fotográfico que cubra todos os tópicos da mecânica trabalhados no Ensino Médio. Para estudar a queda dos corpos desenvolvemos um conjunto de fotografias que estão disponíveis para a comunidade de professores nos Apêndices deste trabalho.

## Apêndice 1 – Fotografias estroboscópicas digitais de esferas de mesma massa e diâmetros diferentes em queda no ar.

Fotografia estroboscópica digital de uma esfera de isopor em queda no ar

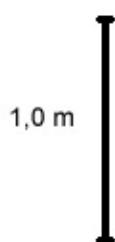
Dados esfera 1

Massa  
 $m = (8,4 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (12,7 \pm 0,5)\text{cm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala



**Fotografia estroboscópica digital de uma esfera de isopor em queda no ar**

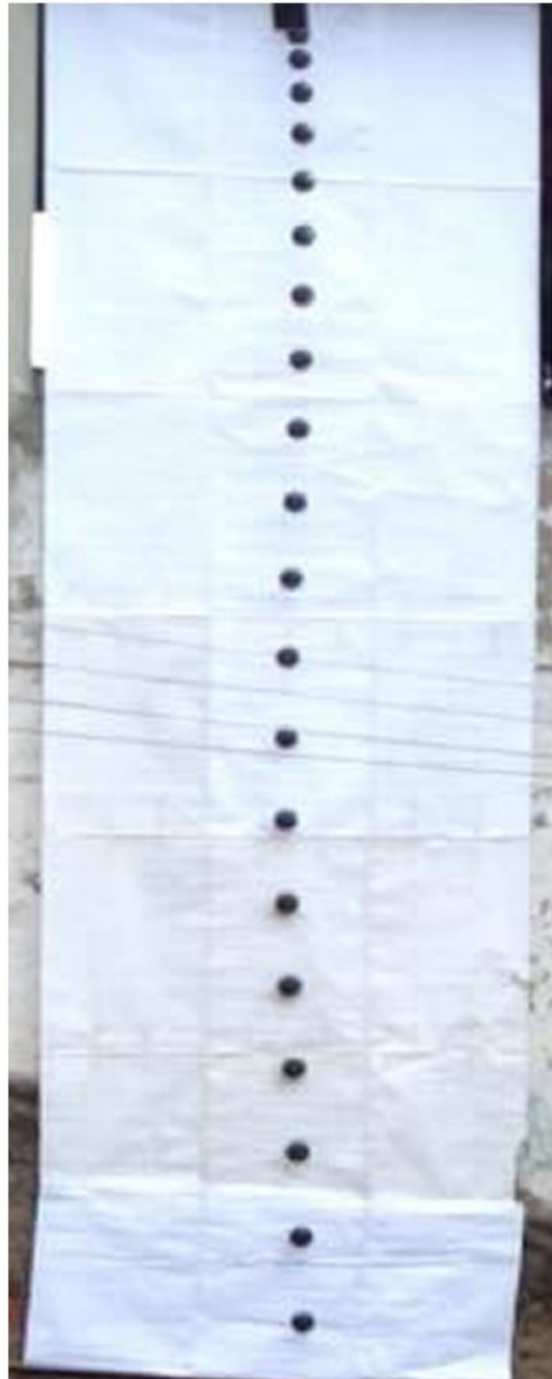
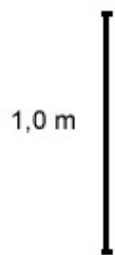
Dados esfera 2

Massa  
 $m = (8,4 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (10,4 \pm 0,5)\text{cm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala



### Fotografia estroboscópica digital de uma esfera de isopor em queda no ar

Dados esfera 3


Massa  
 $m = (8,5 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (7,60 \pm 0,50)\text{cm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala

1,0 m



## Apêndice 2 – Fotografias estroboscópicas digitais de esferas de mesmo diâmetro e massas diferentes em queda no ar.

Fotografia estroboscópica digital de uma esfera de isopor em queda no ar

Dados esfera 4

Massa  
 $m = (5,8 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (10,4 \pm 0,5)\text{cm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala

1,0 m



## Fotografia estroboscópica digital de uma esfera de isopor em queda no ar

Dados esfera 5

Massa  
 $m = (18,5 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (10,4 \pm 0,5)\text{cm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala



## Fotografia estroboscópica digital de uma esfera de isopor em queda no ar

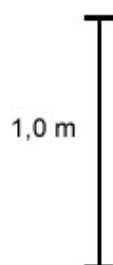
Dados esfera 6

Massa  
 $m = (38,3 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (10,4 \pm 0,5)\text{cm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala





### Apêndice 3 – Fotografias estroboscópicas digitais de esferas de aço em queda através de diferentes meios líquidos.

Fotografia estroboscópica de uma esfera de aço em queda na água

Dados esfera

Massa  
 $m = (13,2 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (5,0 \pm 0,5)\text{mm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala

6,0 cm



## Fotografia estroboscópica de uma esfera de aço em queda no óleo de soja

Dados esfera

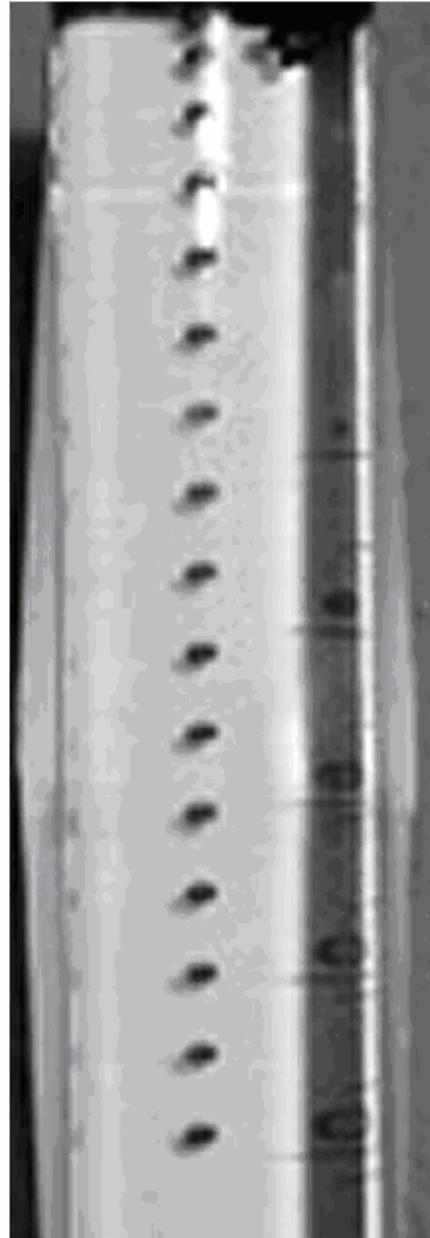
Massa  
 $m = (13,2 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (5,0 \pm 0,5)\text{mm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala

6,0 cm



## Fotografia estroboscópica de uma esfera de aço em queda na glicerina

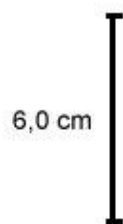
### Dados esfera

Massa  
 $m = (13,2 \pm 0,1)\text{g}$

Diâmetro  
 $D = (5,0 \pm 0,5)\text{mm}$

Intervalo de tempo  
 $\Delta t = 1/15\text{s}$

Escala



# Anexo – Produção de fotografias estroboscópicas sem lâmpada estroboscópica<sup>1</sup>

## Resumo

*A maioria dos alunos do Ensino Médio tem na cinemática o primeiro contato com a Física. Para sua compreensão, é necessária a quantificação conceitual, o que não é trivial, e por isso dificilmente executada em sala de aula. Dentre as possíveis técnicas que permitem fazer medidas precisas, a fotografia estroboscópica tem sido uma solução utilizada em que pese às dificuldades com a aplicação da técnica. Para circundar esses problemas, é apresentada uma solução para a obtenção de fotografias estroboscópicas digitais de qualquer movimento, baseada em dois acessórios atualmente bem difundidos e de baixo custo: a câmara fotográfica digital com recurso para vídeos curtos, de uso amador, e um computador do tipo PC com softwares de acesso gratuito, basicamente o VirtualDub e o ImageJ. A leitura dos dados, que pode ser feita de forma analógica ou digital, fornece excelentes resultados, como mostrados nos exemplos apresentados.*

## I. Introdução

Pesquisas realizadas ao longo de mais de duas décadas mostram que a instrução convencional em Física, que prioriza o formalismo matemático, não facilita aos alunos a compreensão qualitativa dos conceitos. Estes são geralmente apresentados de forma simbólica para os alunos que têm dificuldades para a sua compreensão, e precisam extrair informações a partir das situações experimentais. Dessa forma, a utilização de imagens representativas dos fenômenos pode facilitar a identificação das grandezas físicas relevantes e de suas relações, levando o aluno a estabelecer os modelos físicos (COLINVAUX; BARROS, 2000).

Nas experiências de cinemática, a medida de tempo foi sempre problemática e, assim, se fez necessário introduzir instrumentos mais sofisticados. Por exemplo, nos anos 60, relógios elétricos ligados a chaves, que ligam e desligam acionadas pela passagem do móvel, foram introduzidos pelos fabricantes de equipamentos didáticos. O trilho de ar foi criado na década de 70 pela Ealing (EUA) e o estudo da cinemática melhorado devido às vantagens introduzidas, tais como a minimização do atrito e a introdução do centelhador eletrônico, que registra, através de faíscas, a posição instantânea do móvel num papel termossensível. Atualmente, usam-se células fotoelétricas associadas à interface de um computador, possibilitando o processamento *on-line*. Entretanto, o uso desses equipamentos foi possível somente nas poucas instituições que possuíam laboratórios e condições de adquiri-los.

O estroboscópio foi também utilizado para a medida de intervalos curtos de tempo em várias aplicações no ensino da Física. Entre os exemplos mais conhecidos estão as aplicações na cinemática e no estudo de colisões. Nesses casos, as fotografias revelam aspectos qualitativos do movimento dos corpos, ou de um sistema de corpos, e podem ser

---

<sup>1</sup> Agradecemos aos Cadernos Brasileiros de Ensino de Física a autorização para anexar este artigo.

utilizadas para estudos quantitativos. Houve, porém, dificuldades técnicas e econômicas que impediram a popularização dessa técnica no ensino, já que requer o uso de câmaras fotográficas para filme, ou câmaras Polaroid, uma fonte de luz estroboscópica e uma sala escurecida. Cada um desses itens apresenta dificuldades e/ou custos relativamente altos.

Num trabalho recente, Rosa et al. (2004) propõem uma solução interessante para a construção de uma lâmpada estroboscópica. Em que pese seus aspectos pedagógicos relevantes, a solução ali apresentada pode oferecer dificuldades de execução para os professores. A seguir, discute-se uma solução para a obtenção de fotografias estroboscópicas de qualquer tipo de movimento, baseada em dois acessórios atualmente bem difundidos e de baixo custo, a saber: a câmara fotográfica digital, de uso amador, e um computador do tipo PC com alguns *softwares* de acesso gratuito, apresentados na próxima seção, *VirtualDub*<sup>1</sup> e *ImageJ*<sup>2</sup>.

Existem hoje softwares avançados, por exemplo, o *Tracker3*, que incorporam ferramentas analíticas poderosas para o estudo dos movimentos. A posição pedagógica dos autores é que o aluno participe da construção e da análise dos dados experimentais, utilizando o método descrito neste trabalho. É importante lembrar que no Ensino Médio o professor tem que assegurar que o aluno trabalhe também de forma analógica, saiba fazer medidas com régua, escolher e fazer conversão de escalas, montar tabelas, traçar gráficos e obter resultados que permitam a confrontação com os modelos teóricos ensinados em sala de aula. Esse fazer deve ser anterior à utilização de recursos computacionais mais avançados. A possibilidade de confrontação com modelos teóricos idealizados do fenômeno em estudo dá oportunidade para que o professor discuta os conceitos físicos. Sendo essas ferramentas de qualidade indiscutível, os recursos oferecidos são apropriados para um ensino de Física mais aprofundado, quando a análise dos resultados é o que interessa. Para o aluno do Ensino Médio, os recursos proporcionados por programas mais sofisticados, que praticamente fazem tudo pelo aluno, transformam não somente o computador em 'caixa preta', como também não contribuem para que os conceitos físicos sejam compreendidos.

## II. Descrição do método

O método tem por objetivo produzir uma fotografia estroboscópica de um fenômeno físico que se deseja trabalhar em sala de aula. Utiliza-se para isso uma câmara fotográfica digital com recursos para filmar vídeos de curta duração (alguns segundos) e transformá-lo numa imagem estroboscópica com ajuda de dois programas, de livre acesso, no computador. A maioria das câmaras fotográficas digitais possui hoje esse recurso, diferindo apenas quanto à sua capacidade de gravação. Com a câmara no modo vídeo filma-se a sequência desejada. Após a gravação, o vídeo é transferido para o computador e trabalhado através de dois programas: *VirtualDub*<sup>1</sup> e *ImageJ*<sup>2</sup>, ambos de acesso gratuito.

Como num filme, o vídeo digital é constituído de uma sequência de fotos (fotogramas) digitais feitas em intervalos de tempo fixo. O padrão utilizado na maioria das câmaras atuais é de 15 ou 30 fotogramas por segundo. Com o *VirtualDub*, pode-se selecionar o trecho desejado e decompor a sequência em fotogramas individuais, onde cada um destes revela uma cena do movimento e o seu conjunto fica ordenado temporalmente. Por sua vez, o *ImageJ* permite superpor todas as fotogramas numa única foto, obtendo-se uma autêntica fotografia digital estroboscópica do movimento.

O processo é apresentado através de um exemplo prático cujo objetivo é obter uma fotografia estroboscópica do movimento de um corpo denso em queda livre. A fotografia permite estudar as equações horárias do movimento. No exemplo apresentado, utiliza-se

uma bolinha amarela de plástico (massa = 35g e diâmetro = 5,0cm). A câmara é fixada sobre um tripé. Câmara e tripé são posicionados a três metros de distância de uma parede escura que serve de fundo. Procede-se ao enquadramento prévio do cenário e o início da filmagem. No cenário, a esfera é abandonada a partir do repouso de uma altura de aproximadamente 2 m. Toda a gravação feita não ultrapassa os 30 segundos de duração, apesar de o acionamento da câmara e o lançamento da bola serem feitos pelo próprio experimentador.

O arquivo com o vídeo é transferido da câmara para o PC. O primeiro tratamento consiste em selecionar no vídeo a sequência específica do movimento de queda da bola, e em seguida sua decomposição em fotogramas individuais. Usa-se, para isto, o programa *VirtualDub*. No exemplo tratado, são obtidos 27 fotogramas para toda a sequência de queda. A configuração da máquina utilizada é 30 fotogramas por segundo, logo o intervalo de tempo entre dois fotogramas sucessivos é de  $1/30$  s e o tempo de queda é  $\Delta t_{queda} = 27 \times (1/30) \text{ s} = 0,9 \text{ s}$ .

A segunda etapa consiste em superpor os 27 fotogramas selecionados em uma única foto, o que é feito com o programa *ImageJ*, cujo resultado é apresentado na Fig. 1(a).

Para a análise do movimento registrado na foto, podem-se usar dois procedimentos básicos:

(I) Imprimir a foto, ou apenas a parte da foto que interessa, como na Fig. 1(b), e medir as posições com auxílio de uma régua. Nesse caso, as coordenadas são relativas a uma origem arbitrária tomada sobre a trajetória. Para cada coordenada espacial é associado um instante de tempo  $t$  que é múltiplo inteiro de uma quantidade fixa (esse tempo é o inverso da frequência em que os fotogramas são produzidos,  $\Delta t = 1/30$  s). Nesse caso, o aluno poderá determinar a aceleração da gravidade. No caso da Fig. 1(b), foi utilizada a referência de escala de 2,0m para a trajetória mostrada na figura. A informação da filmagem do vídeo, 30 fotogramas por segundo, permite determinar o intervalo de tempo entre duas posições sucessivas na foto. O valor da aceleração da gravidade obtido foi  $g = (9,74 \pm 0,05) \text{ m/s}^2$ .

(II) Analisar a foto no próprio PC, uma das vantagens da fotografia digital. Existem vários programas, bem difundidos e de fácil acesso (veja, por exemplo, o *PAINT* da Microsoft) que podem ser usados nessa etapa, mas pode-se usar o próprio *ImageJ*, que dispõe de uma grande quantidade de recursos para tratamento de imagens. A tarefa consiste em usar a *régua virtual* para obter as coordenadas de cada posição da bolinha na própria foto: no *ImageJ*, ao movimentar o cursor sobre a foto, podem-se ler, abaixo da barra de ferramentas, as coordenadas do cursor em coordenadas arbitrárias. Nesse sistema de coordenadas, a origem é um dos vértices da foto e os eixos  $x$  e  $y$  são paralelos aos lados da foto. Se a trajetória da bolinha estiver alinhada a um dos lados da foto, será necessário apenas o registro de uma das coordenadas ( $x,y$ ). Se nenhum processo de calibração é aplicado, essas coordenadas representam as coordenadas de um *pixel* (aglutinação das palavras inglesas *picture* e *element*) da foto.



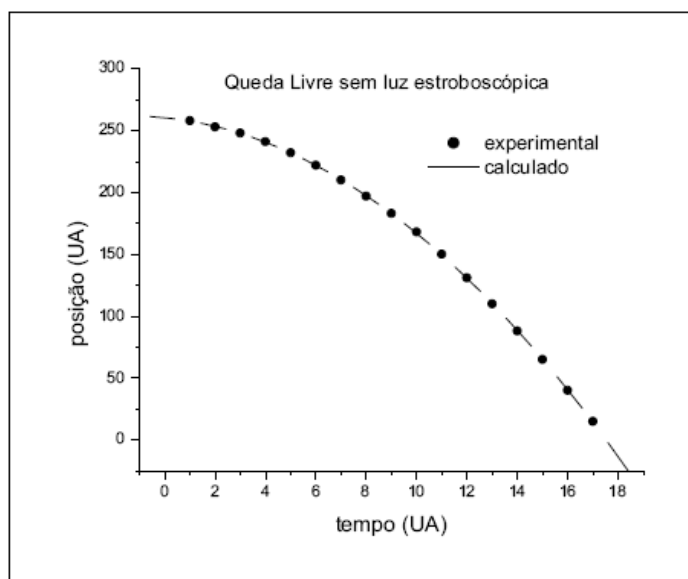
**Fig. 1a – Fotografia estroboscópica do movimento de queda livre de uma bola de plástico (massa = 35 g e diâmetro = 5,0 cm). A distância percorrida pela bola na fotografia foi de aproximadamente 2,0 m.**



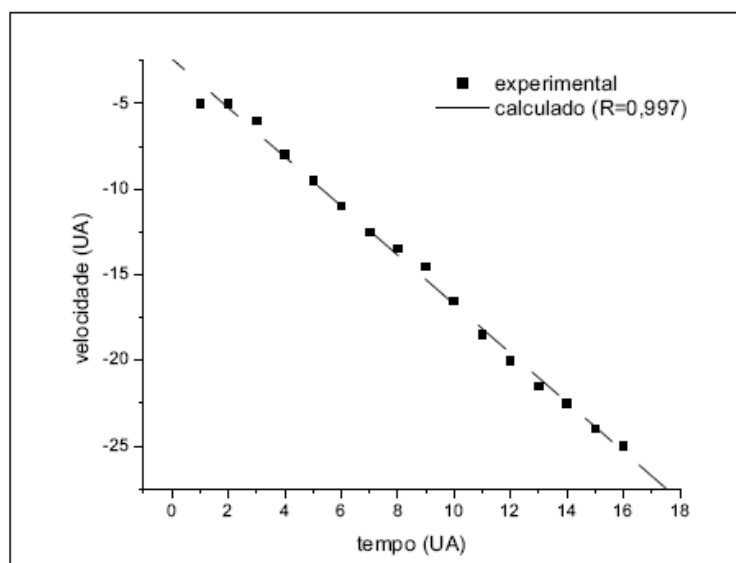
**Fig. 1b – Com o programa ImageJ é possível fazer uma seleção contendo apenas o registro do movimento. Essa fita pode ser usada para ampliação e impressão e é facilmente reproduzível para uso dos alunos.**

O resultado das medidas obtidas com unidades arbitrárias (procedimento II) está representado nos gráficos da Fig. 2. A Fig. 2(a) mostra a equação horária da posição. A linha tracejada é o resultado do ajuste de um polinômio de segunda ordem, via *método dos mínimos quadrados* (VUOLO, 2005) ( $R$  (fator de correlação) = 0,9996), indicando que o movimento de queda livre é um movimento uniformemente variado. A Fig. 2(b) apresenta o gráfico da velocidade (calculado como  $\Delta y / \Delta t$ , para cada intervalo), adequadamente descrito por uma relação linear (linha tracejada).





**Fig. 2a** – Gráfico posição x tempo para o movimento de queda registrado na Fig. 1. A coordenada vertical ( $y$ ) foi tomada relativa à própria foto, com auxílio do ImageJ. A linha tracejada representa um polinômio de segunda ordem, ajustado aos pontos experimentais através do método dos mínimos quadrados ( $R$  (fator de correlação) = 0,9996).



**Fig. 2b** – Gráfico velocidade instantânea x tempo; os pontos experimentais foram determinados tomando-se a velocidade média para cada intervalo. A linha tracejada representa uma função linear ajustada aos pontos experimentais através do método dos mínimos quadrados ( $R$  (fator de correlação) = 0,997). Os resultados obtidos em ambos os gráficos são perfeitamente consistentes com a cinemática da queda livre dos corpos.

### III. Determinação da aceleração da gravidade

Se o objetivo for determinar a aceleração da gravidade, de forma a poder comparar com os valores tabelados, devem-se calibrar as distâncias medidas. Em outras palavras, é preciso conhecer qual a relação entre uma distância medida diretamente na foto e a distância efetiva correspondente no plano do movimento. Isso pode ser facilmente realizado colocando-se dois marcos numa posição próxima ao plano de movimento, com uma distância de separação pré-determinada, conforme feito na Fig. 3. Com os marcos

registrados na fotografia estroboscópica, a conversão de distâncias medidas sobre a foto em distâncias efetivas no plano de movimento é obtida por simples regra de três.



**Fig. 3 – Fotografia estroboscópica do movimento de queda livre de uma pequena esfera branca contra um fundo escuro. A baixa luminosidade do cenário força automaticamente um ajuste do tempo de acumulação (ver item (a) na seção de Discussão) para a formação de cada fotograma. Com o aumento do tempo de acumulação é possível ver o deslocamento da esfera, como um rastro cujo comprimento é proporcional à velocidade. Na figura, os marcos brancos, cuja distância real é 1,0 m, servem como referencial de escala para determinar um parâmetro efetivo do movimento, a aceleração da gravidade.**

A Fig. 4(a) apresenta uma esfera preta sobre um fundo branco resultando num cenário com maior luminosidade. Com essa mudança, elimina-se o efeito do corrimento da imagem observado na Fig. 3. A Fig. 4(b) mostra o gráfico *posição x tempo*, construído em coordenadas efetivas, ao contrário do gráfico análogo da Fig. 2(a), construído com coordenadas lidas diretamente da foto. A origem adotada neste caso não é a posição inicial da esfera. Para esta origem, a velocidade inicial da esfera é não nula. Pelo método dos mínimos quadrados, pode-se obter a equação horária da posição para o movimento uniformemente acelerado,

$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$ , permitindo fazer uma medida de  $g$  no local da queda.

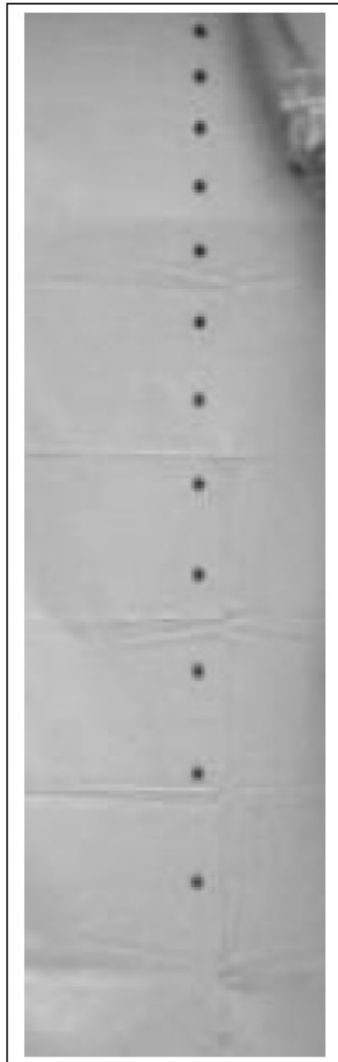
O valor encontrado foi  $g = 9,90(8) \text{ m / s}^2$ , em bom acordo com os valores tabelados nos livros didáticos usuais.

IV. Outros exemplos

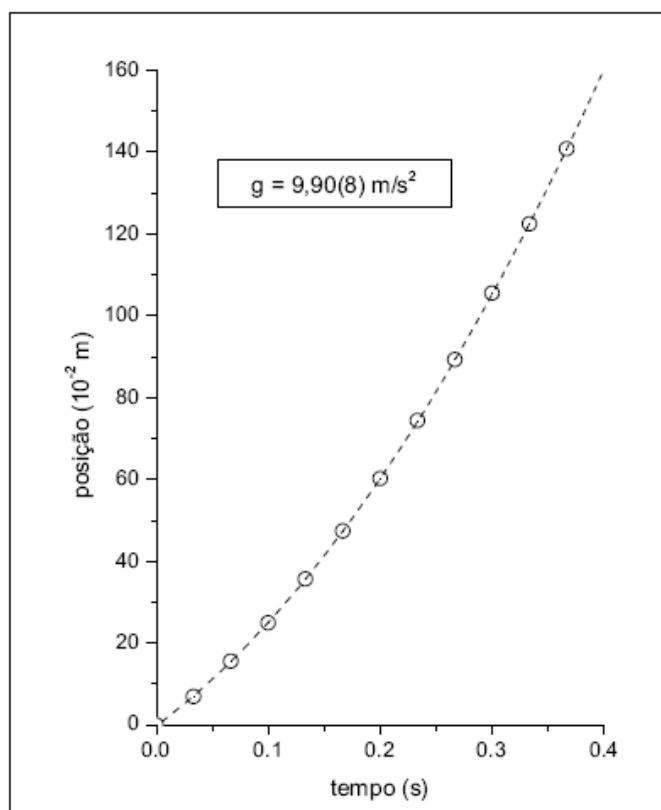
As possibilidades de estudo de fenômenos com a fotografia estroboscópica são muitas. A seguir são apresentados alguns exemplos de situações físicas tratadas mais comumente em sala de aula.

1) Um exemplo de movimento bidimensional é o *problema do lançamento de projéteis*. Se o projétil lançado for extenso é possível analisar o movimento do seu centro de massa (CM) com auxílio de fotografias estroboscópicas. Nesse caso, foi utilizado como projétil um halter de plástico, com uma tarja preta sobre o centro de massa (Fig. 5(a)). O lançamento foi feito de forma a imprimir uma rotação no impulso inicial dado ao halter. O movimento resultante, composição da translação e rotação em torno do CM, é complexo e difícil de descrever. Porém, o movimento do CM se comporta como uma partícula. O resultado pode ser visto na Fig. 5(b).

Medindo as coordenadas relativas  $(x,y)$  do CM com auxílio do *ImageJ*, ou analogicamente com uma régua, pode-se construir o gráfico mostrado na Fig. 6(a). Nesse caso não foi medido o tempo, mas apenas as coordenadas espaciais. A linha tracejada corresponde a um polinômio do segundo grau, ajustado aos pontos experimentais através do método dos mínimos quadrados ( $R = 0.9999$ ). Verifica-se, desse modo, a independência do movimento do CM em relação à rotação, como se toda a massa do altere estivesse ali concentrada. Por sua vez, as medidas da coordenada  $x$  (eixo horizontal) em função do tempo ( $t$ ) permitem construir o gráfico da Fig. 6(b), que mostra que ao longo do eixo horizontal o movimento é uniforme.



**Fig. 4a – Fotografia estroboscópica do movimento de queda livre de uma pequena esfera preta contra um fundo claro. O aumento de luminosidade no cenário diminui correlativamente o tempo de acumulação para a formação de um fotograma. O efeito de corrimento observado na Fig. 3 não é observado aqui.**



2) Para mostrar a independência da aceleração de queda livre dos corpos com relação à massa duas bolinhas de massas diferentes foram lançadas simultaneamente da mesma altura. O resultado é observado na Fig. 7.

O aspecto mais curioso desse exemplo fica por conta da dificuldade de se sincronizar o lançamento manual dos dois corpos. Nesse caso, a sensibilidade da fotografia estroboscópica é capaz de revelar uma mínima perda de sincronismo. Por outro lado, a facilidade do sistema digital fica em evidência, uma vez que todo o processo permite realizar muitos testes de forma rápida. Vê-se aqui uma boa oportunidade de provocar os alunos para um debate animado em sala de aula.

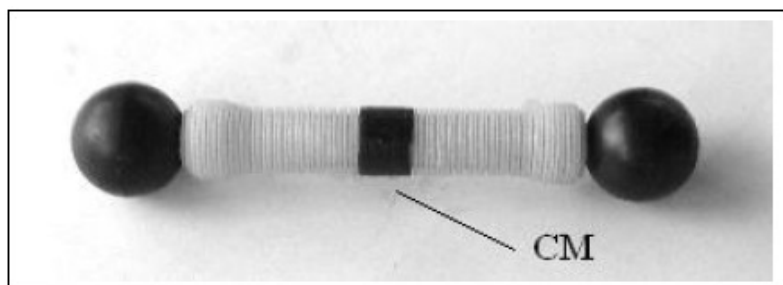
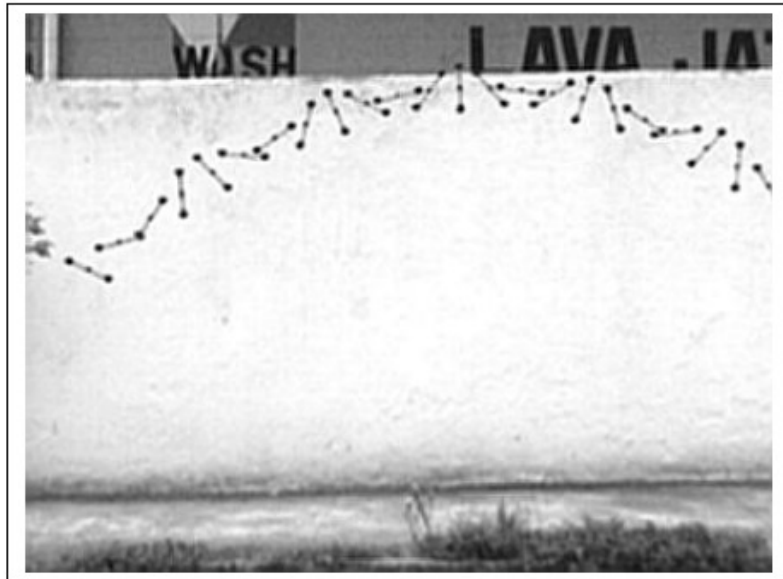
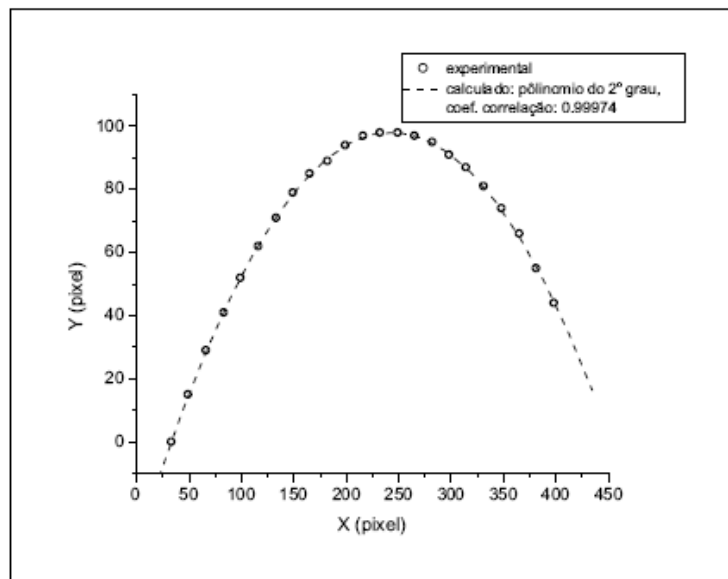


Fig. 5a – Halter de plástico com uma tarja preta indicando a posição do seu centro de massa CM.



**Fig. 5b** – O halter, sobre um fundo branco, recebe um impulso de lançamento com rotação inicial. A fotografia estroboscópica permite visualizar a trajetória do CM representado pelo ponto preto menor.



**Fig. 6a** – É mostrada a trajetória do CM do halter. A linha contínua mostra que o ajuste dos pontos experimentais pelo método dos mínimos quadrados é um polinômio de 2ª ordem, o que indica a adequação do modelo de movimento de um projétil em queda livre para explicar esse movimento.

3) Uma atividade impensável com as antigas técnicas de fotografia estroboscópica, mas que a máquina digital torna viável é a medição da velocidade de um avião em vôo. Os valores inseridos na Fig. 8(a) são as medidas das coordenadas da componente perpendicular à direção de visada, em *pixel*, obtidos com auxílio do *ImageJ*. Com as informações sobre as dimensões da aeronave, disponibilizadas pela companhia aérea, Fig. 8(b), pode-se fazer uma escala de conversão para determinar sua velocidade de cruzeiro.

## V. Discussão

Alguns detalhes importantes devem ser mencionados:

(a) *Formação de estrias*: quando o movimento a ser filmado é muito rápido é usual que a imagem do objeto, em um único fotograma, esteja corrida. Esse efeito é o mesmo que observamos em certos cartões postais de paisagens noturnas onde haja presença de automóveis em movimento, com faróis ou luzes de sinalização ligadas. Vemos linhas luminosas contínuas indicando que o objeto estava em movimento no cenário fotografado. O corrimento se deve ao fato de que cada fotograma não é obtido instantaneamente, sendo necessário um intervalo de tempo finito ( $\delta t$ ) para que o sensor ótico (um CCD, *Charge-Coupled Device*, no caso das câmaras digitais) acumule o sinal luminoso incidente. Assim, se a velocidade do objeto for muito alta, o seu deslocamento apresentar-se-á borrado durante o período de acumulação, como pode ser observado na Fig. 3.

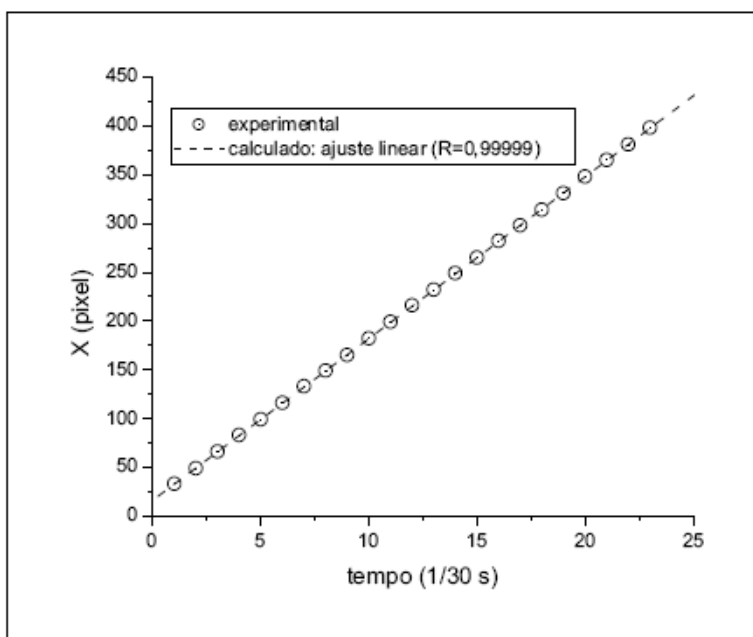


Fig. 6b – Gráfico da posição horizontal  $x$  versus tempo. A linha tracejada representa uma função linear através do ajuste dos dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados. Esse resultado evidencia um movimento uniforme na direção horizontal, como previsto pelo modelo.

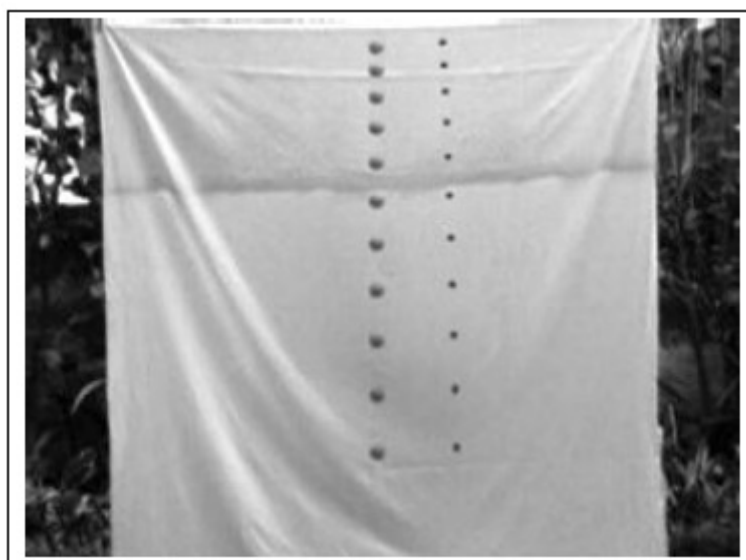


Fig. 7 – Fotografia estroboscópica que mostra o lançamento simultâneo de duas bolinhas

de massas diferentes, soltas a partir do repouso e da mesma altura. O exemplo evidencia o modelo de queda livre, que estabelece a independência da aceleração em relação à massa dos corpos.

Uma forma de se evitar a formação de estrias é diminuir o tempo de acumulação pelo CCD. Isso pode ser feito aumentando-se a sensibilidade da câmara ou aumentando-se a luminosidade do cenário para uma dada configuração. Em geral, as câmaras digitais mais simples não permitem a alteração da sensibilidade ótica quando operadas no modo de vídeo, restando apenas a segunda solução. Aumentando-se a luminosidade do cenário, a câmara ajusta automaticamente o tempo de acumulação, obedecendo à seguinte relação: mais luz, menos tempo. Esse efeito pode ser observado na Fig. 4(a), onde se usa um fundo branco (mais luz) e uma esfera preta (maior contraste com o fundo), onde o efeito de corrimento é praticamente desprezível.

É importante ressaltar que mesmo com o efeito de corrimento é ainda possível a utilização da fotografia para análises quantitativas. Como o tempo de acumulação é pequeno, podemos tomar a posição do móvel como correspondendo ao centro da estria. As análises realizadas mostram que esta é uma boa aproximação.

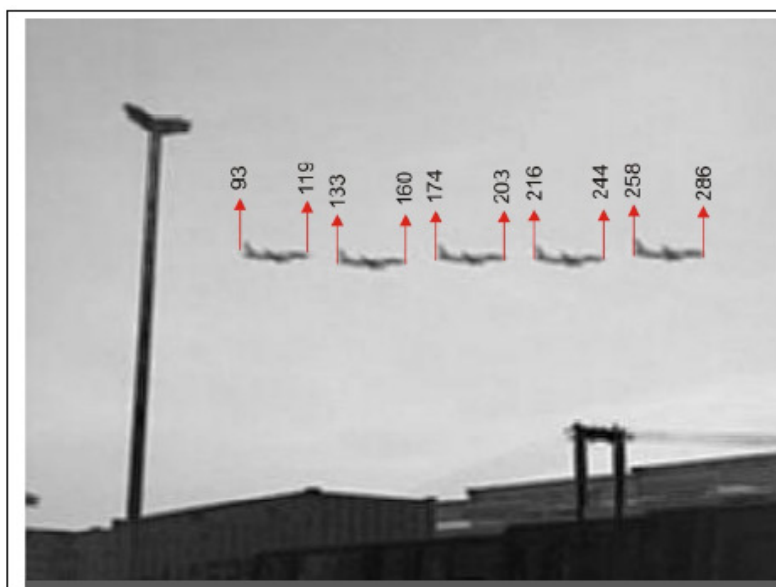


Fig. 8a – Fotografia estroboscópica do movimento de um Boeing 737- 800, com a indicação das posições, tomadas a cada 15 fotogramas, em *pixels*.



Fig. 8b – Fotografia do avião com informações sobre o seu comprimento.



(b) *Formatos de vídeo*: Muitos são os formatos de vídeos digitais produzidos em câmaras fotográficas. Os mais comuns são AVI (Audio Video Interleave), MPEG (Moving Picture Expert Group) e MOV (formato de vídeo usado pelo *QuickTime*). O *VirtualDub* não abre (importa) todos os formatos, tornando necessária sua conversão. Um exemplo prático são os vídeos no formato MOV usado pelas câmaras da marca Olympus, entre outras. Esse formato não é importado pelo *VirtualDub*. Uma das soluções mais simples para contornar essa limitação é utilizar um programa de conversão de formatos, por exemplo o *Any Video Converter4*, programa gratuito disponível para *download* que faz a conversão do formato MOV para MPEG-I sem alterar a qualidade do vídeo. Com o novo arquivo no formato MPEG-I, procede-se normalmente a produção da fotografia estroboscópica.

(c) *Uso de tripé*: A utilização de tripé melhora a qualidade do vídeo, pois facilita a escolha dos ângulos para enquadramento e evita trepidações. Bons tripés podem ser encontrados no comércio a preços acessíveis. Entretanto, a improvisação de uma base de apoio que substitua um tripé é de fácil elaboração, pois o parafuso que se encaixa no fundo da câmara é de fácil aquisição no comércio, tornando a tarefa dependente apenas da criatividade de cada um.

(d) O uso dos programas é explicado no Anexo do trabalho.

## VI. Conclusão

As vantagens da técnica apresentada são várias, dentre estas citamos algumas:

i. a possibilidade de reprodução das fotografias a baixíssimo custo para o trabalho individual do aluno;

ii. a produção de material didático, relacionado aos fenômenos básicos da Mecânica da partícula, que normalmente requerem a utilização de equipamentos mais elaborados, nem sempre disponíveis na escola;

iii. a facilidade de montar uma coleção significativa de fotografias estroboscópicas de fenômenos interessantes que podem motivar o aluno (veja-se o exemplo do Boeing 737-800 nas Fig. 8(a) e 8(b)), que serão úteis em sala de aula para trabalhos individuais dos alunos, avaliação de aprendizagem, etc.;

iv. a possibilidade do professor trabalhar o fenômeno físico de forma “experimental”, ilustrar sua aula e ajudar os alunos a compreender melhor os conceitos físicos subjacentes, e

v. o fato de que a qualidade da imagem possibilita a visualização do movimento ‘real’ e permite tanto sua descrição qualitativa quanto a obtenção de dados experimentais fidedignos para a análise quantitativa.

## Anexo

Os programas *ImageJ* e *VirtualDub* são fáceis de serem utilizados e instalados, mas vão requerer um pouco de treinamento dos usuários menos experientes com o uso de aplicativos dedicados à manipulação de imagens e vídeos. Damos, aqui, algumas instruções introdutórias que serão suficientes para se iniciar a aplicação da técnica:

1. Criar um diretório no seu computador para manipular os vídeos produzidos. Verifique o formato de gravação utilizado por sua câmara.

2. Acionar o programa *VirtualDub*. Com a tela do programa aberta, acione a tecla FILE e em seguida OPEN VIDEO FILE. Indique o diretório (criado no item 1) onde se encontra o vídeo a ser trabalhado. Observe na caixa de diálogo aberta que o *VirtualDub*

suporta uma grande quantidade de formatos de vídeo. Se o formato de vídeo que a câmara produz não for compatível, será necessário convertê-lo previamente (veja item (b) acima). Abrir o arquivo de vídeo selecionado.

3. Observar a linha de tempo na parte inferior da tela do programa. Ela mostra uma sequência numerada para os fotogramas. O número total de fotogramas que compõem o vídeo está indicado no final da sequência. Logo abaixo da linha de tempo, observe a barra de botões. Com os botões é possível rodar o vídeo, parar e saltar quadro a quadro.

4. Um pequeno cursor sobre a linha de tempo pode ser movimentado com auxílio do mouse. Movimentando o cursor com o mouse é possível encontrar o fotograma que marca o início da sequência do movimento de interesse. Estacionar o cursor sobre esse fotograma e marcar essa posição, acionando com o mouse o penúltimo botão da esquerda para direita. Em seguida, movimentar o curso para localizar o último fotograma da sequência de movimento. Marcar essa posição acionando com o mouse o último botão. Uma tarja colorida passa a indicar a sequência selecionada.

5. Para converter a sequência selecionada em fotogramas individuais, acionar a tecla FILE, em seguida a opção EXPORT e, por fim, IMAGE SEQUENCE. Uma pequena caixa de diálogo será aberta. Preencher os espaços solicitados indicando o nome que deseja dar aos arquivos com os fotogramas; no item FILENAME SUFFIX, INCLUDING a opção “default” é .jpeg, a qual deve ser mantida; no item DIRECTORY TO HOLD indicar o diretório de trabalho escolhido em d1. Acionar a tecla OK para finalizar.

6. Verificar no diretório de trabalho que a sequência de fotogramas, em formato JPEG, foi criada. Cada fotograma tem o FILENAME selecionado no item anterior acrescido de uma numeração com dois dígitos. Cada fotograma é agora uma fotografia digital, que pode ser visualizada e manuseada em seu computador.

7. Para obter a fotografia estroboscópica a partir da sequência de fotogramas, acionar o programa *ImageJ*. Com a tela do programa aberta, acionar a tecla FILE, em seguida IMPORT e, finalmente, IMAGE SEQUENCE. Uma caixa de diálogo será aberta: indicar o diretório de trabalho (criado no item 1) onde se encontra a sequência de fotogramas. Com o mouse, iluminar o arquivo do primeiro fotograma da sequência e em seguida a tecla OK para finalizar. Uma outra caixa de diálogo será aberta. O programa automaticamente identifica a sequência e faz a contagem de fotogramas. Ainda nesta caixa de diálogo pode-se optar por converter os fotogramas coloridos em fotogramas preto e branco (tons de cinza). Essa opção pode ser interessante para posteriores tratamentos da fotografia estroboscópica, bem como para a impressão final da imagem. Nesse caso, escolher a opção CONVERT TO 8-BIT GRAYSCALE. Acionar a tecla OK para finalizar. O painel do *ImageJ* passa a mostrar o primeiro fotograma da sequência.

8. Para se obter a superposição de todos os fotogramas, acione a tecla IMAGE. No menu apresentado, acionar a tecla STACK (empilhar) e em sequência selecionar a opção Z PROJECT. Uma caixa de diálogo será aberta indicando o número do primeiro e do último fotograma da sequência. Será necessário escolher o tipo de projeção (PROJECTION TYPE). As duas opções básicas são por MIN INTENSITY (mínima intensidade) ou por MAX INTENSITY (máxima intensidade). Se os objetos em movimento são escuros em relação ao fundo deve-se optar por MIN INTENSITY. Se os objetos estiverem claros em relação ao fundo, optar por MAX INTENSITY. Acionar a tecla OK para finalizar. O painel do *ImageJ* passa a exibir a fotografia estroboscópica.

Os programas utilizados estão disponíveis nos endereços abaixo:

1. <http://www.virtualdub.org/index>. Acesso em: 13 fev. 2011.
2. <http://rsb.info.nih.gov/ij/>. Acesso em: 13 fev. 2011.
3. <http://www.any-video-converter.com>. Acessado em 13 fev. 2011.

## Referências bibliográficas

- ALONSO, M. e FINN, E. J. Física: um curso universitário. V. 1.Ed. Edgar Blucher. 1972
- ALVES FILHO, J. P.; Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v.17, n.2. 2000
- ARONS, A. B., Teaching Introductory Physics. University of Washington. John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- ARRUDA, S. M.; SILVA, M. R. DA; e LABURÚ, C. E.; Laboratório didático de Física a partir de uma perspectiva Kuhniana.. Investigação em Ensino de Ciências. V. 6, n. 1, 2001.
- BAIRD, J. R.. Metacognition, , purposeful enquiry and conceptual change. IN E. HEGARTY-HAZEL.1990
- BARRON, B. J. S., SCHWARTZ, D. L., VYE, N. J., MOORE, A., PETROSINO, A., ZECH, L., & BRANSFORD, D. J.. Doing with understanding: lessons from research on problem and project-based learning. The journal of the learning sciences, 7, 271–311. 1998
- BARROSO, M. F. e FRANCO, C. Avaliações educacionais: o PISA e o ensino de ciências. XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física – Curitiba – 2008.
- BLACKWOOD, O. H., HERRON, W. B., KELLY, W. C.; Física na escola secundária. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora Fundo de Cultura S. A., 1971.
- BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio*. Brasília: MEC, 1999.
- CARRASCOSA, J.; PEREZ, D. G.; VILCHEZ, A.; VALDEZ, P.; Papel de la actividad experimental en la educación científica. Caderno brasileiro de ensino de Física. v. 23, n. 2: p. 157-181, ago. 2006
- CARLSEN, W. S. Handbook of research on science education. 2006. P. 57 – 74. Language and science learning.
- CARVALHO, A. M. P. Enculturação Científica: uma meta no ensino de ciências. Texto apresentado no XIV ENDIPE, Porto Alegre, abril (2008) 12 págs.
- COLINVAUX, D. Aprendizagem: as questões de sempre, a pesquisa e a docência. 2008. Ciência em tela. V.1, n.1.
- DA LUZ, A. M. R.; ALVARES, B. A. Física – volume 1. São Paulo: Editora Scipione, 2005.

DIAS, M. A.; BARROS, S. S.; AMORIM, H. S. Produção de fotografias estroboscópica sem lâmpada estroboscópica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Vol. 26, No 3 (2009)

ELIA, M. Ensino não experimental de uma ciência experimental: um problema cultural brasileiro. 1982. SNEF

ERTHAL, J. P. C.; GASPAR, A. Aulas demonstrativas nos cursos básicos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. 23, 3, 345-359, 2006.

FILHO, G. F. de S. Simuladores computacionais para o ensino de Física básica: uma discussão sobre produção e uso. Dissertação de mestrado. UFRJ. 2010.

GASPAR, A. Física – mecânica. São Paulo: Editora Ática, 2002.

GEDEÃO, A. Poema para Galileo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, RBEF. V. 1, n. 1, 1979.

GRF. GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Física 1: mecânica. São Paulo: Editora da USP, 2001.

GRF. GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Leituras de física. Para ler fazer e pensar, São Paulo. Disponível em:  
< <http://www.if.usp.br/gref/mec/mec2.pdf>>. Acesso em: jan. 2011.

GUIA DO PROFESSOR. Projeto de Ensino de Física. Rio de Janeiro, Fename, 1980.

HETCH, E. Física em perspectiva. Addison Wesley Iberoamericana AS. Delaware, 1987.

HEWIT, P. G., Física Conceitual. 9 Ed. Bookman, 2002.

HOFSTEIN, A. E LUNETTA, V. N. (2003) The laboratory in science education: foundations for the twenty-first century. *Science Education*, vol. 88, ISSUE 1, PP.28-54

HOLTON, G, RUTHERFORD, F. J., FLETCHER, G. W., Projecto Física, unidade 1, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985, Lisboa.

JUNIOR, F. R.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. Os fundamentos da física – volume 1. São Paulo: Editora Moderna, 2003.

LEMKE, J. L. Investigar para el futuro de la education científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir. *Enseñansa de lãs ciencias*, 2006, 24(1), 5-12

LOCATELLI, R. J.; CARVALHO, A. M. P.; Uma análise do raciocínio utilizado pelos alunos ao resolverem os problemas propostos nas atividades de conhecimento físico. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*. Vol. 7 No 3, 2007

MAGALHÃES, M. A. B. DE., Novas tecnologias para o *ensino* das *Ciências*: condicionantes de sua utilização na sala de aula. Rio de Janeiro: PUC-RJ, 1979. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1979.

MILLAR, R. LÊ MARECHAL, J. F. e BUTY, C. A map of the variety of labwork. 1998. <http://www.education.leeds.ac.uk/research/cssme/wp1.pdf>. Acessado em janeiro de 2011.

MOREIRA, M. A. Pesquisa básica em educação: uma visão pessoal. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/~moreira/Pesquisa.pdf>. Acessado em 17-01-2011

MOREIRA, M. A.; Ensino de Física no Brasil: Retrospectiva e Perspectivas. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 1. 2000

MUSEU ANTARES DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. <http://www.uefs.br/antares/museuantares.html>. Acessado em setembro de 2010

NARDI, R. e ALMEIDA, M. J. P. M. de. Memórias da educação em Ciências no Brasil: a pesquisa em ensino de Física. Investigações em ensino de Ciências. Porto Alegre, v. 10, n. 1, 2005.

NEDELSKY, L. Introductory physics laboratory, *American Journal of Physics*, 26, 2, 51-59, 1958.

PARECER 033/2006 do CEE da SEE do RJ, disponível em <http://www.cee.rj.gov.br/coletanea/pn060033.pdf>, acessado em 06/02/2010

PENA, F. L. A. e FILHO, A. R., Obstáculos para o uso da experimentação no ensino de Física: um estudo a partir de relatos de experiências pedagógicas brasileiras publicados em periódicos nacionais da área (1971-2006). *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*. Vol. 9 No 1, 2009

PERINI, L., FERREIRA, G. K. e CLEMENT, L. Projeto de ensino PSSC: uma análise dos exercícios/problemas. 2009. XVIII SNEF. Vitória, ES.

PSSC - PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITTEE.. Física parte III. São Paulo: EDART, 1967.

RESNICK, R., HALLIDAY, D., KRANE, K. S. Física, v. 2. Tradução de Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco et al. 5 ed. LTC editora. Rio de Janeiro, 2007.

PORTO, C. M., A física de Aristóteles: uma construção ingênuas?. *Revista Brasileira de ensino de Física*. V. 3, N. 4. 2009

RUIZ, A. I., RAMOS, M. N., HINGEL, M. Escassez de professores no Ensino Médio: Propostas estruturais e emergenciais. 2007. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/escassez1.pdf>. Acesso em julho de 2010.

SBF, [http://www.sbfisica.org.br/~snef/xix/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7&Itemid=9](http://www.sbfisica.org.br/~snef/xix/index.php?option=com_content&view=article&id=7&Itemid=9). Acessado em 17-01-2011

SERÉ, M. G.; COELHO, M. S.; DIAS, N. A. O papel da experimentação no ensino da Física. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 20, n. 1, 2003.