



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA E CIENTÍFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS E
MATEMÁTICAS

MANOEL JANUÁRIO DA SILVA NETO

**ENSINO DE FÍSICA PELA COMPARAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO E MODELO
TEÓRICO COM USO DA MODELAGEM MATEMÁTICA**

Belém-Pará
2015

MANOEL JANUÁRIO DA SILVA NETO

**ENSINO DE FÍSICA PELA COMPARAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO E MODELO
TEÓRICO COM USO DA MODELAGEM MATEMÁTICA**

Tese apresentado ao Programa de Pós-graduação em Educação em Ciências e Matemáticas (PPGECM) do Instituto de Educação Matemática e Científica da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Educação em Ciências e Matemáticas, na linha de pesquisa Educação Matemática - Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Oliveira do Espírito Santo.

Belém-Pará
2015

MANOEL JANUÁRIO DA SILVA NETO

**ENSINO DE FÍSICA PELA COMPARAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO E MODELO
TEÓRICO COM USO DA MODELAGEM MATEMÁTICA**

Tese apresentado ao Programa de Pós-graduação em Educação em Ciências e Matemáticas (PPGECM) do Instituto de Educação Matemática e Científica da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Educação em Ciências e Matemáticas, na linha de pesquisa Educação Matemática - Modelagem Matemática.

Comissão Examinadora

Data da defesa: 22 de outubro de 2015.

Prof. Dr. Adilson Oliveira do Espírito Santo
Orientador - IEMCI/PPGECM/ UFPA

Prof. Dr. José Jerônimo Alencar
Examinador interno - IEMCI/PPGECM/ UFPA

Prof. Dr. Licurgo Peixoto Brito
Examinador interno - IEMCI/PPGECM/ UFPA

Prof. Dr. João Furtado de Souza
Examinador interno - UFPA/ICEN

Prof. Dr. Ruy Guilherme Castro de Almeida
Examinador externo - Universidade Estadual do Pará

*A Iara Neves, esposa querida, pelo amor,
apoio e companheirismo.*

*Aos meus filhos, Ivone e Henrique,
por nos presentear com suas alegrias.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus Pais, por acreditarem que a educação é a essência da formação da pessoa.

Ao prof. Adilson meu Orientador, pela aceitação em me orientar, localizando-se nos momentos críticos, evitando desvios infortúnios.

À Banca Examinadora, por suas valiosas contribuições na otimização deste trabalho.

Ao Prof. João Furtado, pela amizade, incentivo e contribuições incomensuráveis.

Ao Prof. Jerônimo Alves, pela amizade e coorientação. Sem suas sugestões, esse trabalho não teria sido realizado.

Ao Prof. Alfredo Furtado, por suas valiosas sugestões que contribuíram para uma parceria profissional.

Ao Prof. Jorge Trindade, grande incentivador para a realização deste doutorado.

Ao Prof. Edmilson Santos, por sua ajuda e contribuição na apresentação ao orientador.

Ao amigo Elias Nonato, pela amizade e ajuda na confecção dos objetos de alguns experimentos.

Ao Prof. José M. F. Bassalo, humanista e eterno incentivador.

Aos Colegas do GEMM, em especial à colega Roberta M. Braga, pela parceria nos artigos e contribuições.

Aos Professores e Técnicos Administrativos da Faculdade de Física (em especial Victor Façanha, José Luiz, Klaus Cozollino, Fátima Baraúna, Simone Fraiha, Zínia Aquino, Rubens Silva e Sérgio).

Aos Alunos que contribuíram de forma magistral, por suas atitudes e opiniões.

À Biblioteca do NAEA, lugar de estímulo à produtividade em que pude desfrutar de um sossego e apoio essencial à realização deste trabalho.

Ao IEMCI, pela aprendizagem que me proporcionou, por meio dos professores, alunos e amigos, a entender o real significado do que é ser professor.

Ao ICEN, pelo apoio importante e necessário.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), minha grande mãe acadêmica a quem devo e pagar-lhe-ei com dedicação no tempo que me resta de vida profissional.

*“Se não fores capaz de medir,
Teu conhecimento é insuficiente e insatisfatório”.*

(Lord Kelvin)

RESUMO

O ensino das disciplinas experimentais de Física tem sido realizado com o uso de manuais ou roteiros das experiências. Esta abordagem tem-se mostrado inadequada para aprendizagem de conceitos físicos por parte de estudantes. Em face disto, esta tese teve como objetivo realizar um estudo de uma estratégia de ensino baseado nas ideias de Thomas Kuhn e adaptado por Zylbersztajn (1991) e Arruda; Silva e Laburú (2001) da ciência normal em sala de aula, com o uso da modelagem matemática e ênfase na experimentação de conceitos, leis e teorias. A pesquisa foi realizada com um grupo de alunos nos cursos superiores de Engenharia Civil e Licenciatura em Ciências Naturais; foram feitas análises investigativas por meio de uma abordagem mista (qualitativa e quantitativa), com a qual foi possível confirmar a hipótese do modelo. Apesar de algumas considerações relativas à sua aplicação, esta abordagem mostrou-se apropriada para ensino e aprendizagem de conteúdos de disciplinas experimentais de Física.

Palavras-chave: Ensino de Física Experimental. Modelagem Matemática. Thomas Kuhn.

ABSTRACT

The teaching of experimental disciplines of physics has been carried out with the use of manual or experiences of scripts. This approach has proven unsuitable for learning physical concepts by students. In view of this, this thesis aimed to carry out a study of a teaching strategy based on Thomas Kuhn's ideas and adapted by Zylbersztajn (1991) and Arruda; Silva and Laburú (2001) of normal science in the classroom, using mathematical modeling and emphasis on experimental concepts, laws and theories. The survey was conducted with a group of students in higher courses of Civil Engineering and a Degree in Natural Sciences; investigative analyzes were performed using a mixed approach (qualitative and quantitative), with which it was possible to confirm the model assumption. Despite some considerations relating to its application, this approach proved to be suitable for teaching and learning content of experimental disciplines of Physics.

Keywords: Experimental Physics Teaching. Mathematical Modeling. Thomas Kuhn.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Execução de um experimento no laboratório didático.....	23
Figura 2 - Modelo atual das etapas da metodologia aplicada num laboratório didático de física.....	24
Figura 3 - Ilustração da revolução científica por meio do conceito de paradigma e ciência.....	27
Figura 4 - Tipos abordagem de Thomas Kuhn para a relação da teoria com a experimentação	32
Figura 5 - Ensino por meio da experimentação.....	37
Figura 6 - Proposta de Bassanezi (2009) para modelagem matemática.....	42
Figura 7 - Constituição do processo de medida.....	50
Figura 8 - Processo de medição da grandeza até o modelo.....	54
Figura 9 - Convenção para investigação dos tipos de erros na execução do experimento.....	56
Figura 10 - Medição de um objeto por uma régua metálica.....	57
Figura 11 - Erro de paralaxe na leitura de uma escala	58
Figura 12 - Erros aleatórios e sistemáticos em relação a um alvo de medidas.....	59
Figura 13 - Ações para o laboratório didático.....	64
Figura 14 - Ações da modelagem matemática pela abordagem Chaves; Espírito Santo (2011).....	64
Figura 15 - Etapas do processo de modelagem matemática no laboratório didático.....	68
Figura 16 - Método hipotético-dedutivo esquematizado por Lakatos; Marconi (2011), baseado em Bunge (1989).....	73
Figura 17 - Acertos e Intervenções na atividade de Teoria de Erros por meio da Modelagem Matemática.....	81
Figura 18 - Esquema de execução do experimento.....	89
Figura 19 - Intervenções na atividade de momento de inércia por meio da MM.....	91
Figura 20 - Experimento da Lei de Hook.....	93
Figura 21 - Intervenções no experimento da Lei de Hook por meio da Modelagem Matemática.....	98
Figura 22 - Características da aprendizagem com uso da MM na experimentação.....	103
Figura 23 - Experimento do M.R.U.	105
Figura 24 - Intervenções no experimento do M.R.U. por meio da Modelagem Matemática.....	109
Figura 25 - Infográfico dos resultados obtidos.....	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos aspectos de um laboratório tradicional e as atividades investigativas.....	25
Quadro 2 - Exemplos de ciências paradigmáticas usadas por Kuhn (2011a).....	28
Quadro 3 - Abordagem de Zylbersztajn (1991, p. 6-8), a partir do ensaio de Kuhn (2011a).....	30
Quadro 4 - Tipos de exames, segundo Bunge (2008), para validação de uma teoria física.....	36
Quadro 5 - Classificação dos modelos conforme suas características.....	38
Quadro 6 - Proposta de Chaves e Espírito Santo (2011) da Possibilidade de Modelagem Matemática em Sala de Aula...	40
Quadro 7 - Classificação dos Laboratórios Didáticos - Alves Filho (2000, p.175-177).....	44
Quadro 8 - Tipos de laboratório no contexto do ensino e abordagem.....	46
Quadro 9 - Tipos de laboratório no contexto do experimento.....	49
Quadro 10 - Unidades de Base do Sistema Internacional de Unidades (SI).....	52
Quadro 11 - Classificação de erros aleatórios e sistemáticos.....	60
Quadro 12 - Categorias de análise.....	92
Quadro 13 - Categorias de análise.....	113
Quadro 14 - Ações características e propostas por experimento.....	114

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Questionamentos do número de alunos que responderam com erros e acertos. Classificação das repostas.....	87
Gráfico 2 - Questionamentos do número de alunos que responderam com erros e acertos.....	88
Gráfico 3 - Questionamentos do número de alunos que responderam com erros e acertos.....	88
Gráfico 4 - Questionamentos do número de alunos que responderam com erros e acertos.....	88
Gráfico 5 - Gráficos da Força (F) pela Distensão (X) com dados experimentais, medida pela turma B e a curva teórica pela equação da Lei de Hook.....	95
Gráfico 6 - Gráficos da Força (F) pela Distensão (X) com dados experimentais, medida pela turma A e a curva teórica pela equação da lei de Hook.....	96
Gráfico 7 - Gráficos de algumas medidas do Deslocamento (X) vrs Tempo (t), do movimento da esfera de aço e da bolha de ar...	107
Gráfico 8 - Gráficos de algumas medidas do Deslocamento (X) vrs Tempo (t), do movimento da esfera de aço e bolha de ar.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos da medida do tempo referente ao deslocamento dos objetos no plano inclinado.....	85
Tabela 2 - Resultados das medições da altura e inclinação do plano inclinado e cálculo da velocidade e aceleração dos três corpos: Esfera (E), Cilindro Maciço (CM) e Cilindro Oco (CO).....	89
Tabela 3 - Resultados de algumas medições da Força (F) e Distensão (X), realizado pelos alunos A.....	94
Tabela 4 - Resultados de algumas medições da Força (F) e Distensão (X), realizado pelos alunos B.....	94
Tabela 5 - Resultados de algumas medições do Deslocamento (X) e Tempo (t), do movimento da esfera de aço.....	106
Tabela 6 - Resultados de algumas medições do Deslocamento (X) e Tempo (t), do movimento da bolha de ar.....	106

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Hipótese.....	17
1.4 Justificativa.....	17
1.6 Trajetória Profissional do Autor.....	18
CAPÍTULO II – ENSINO DE FÍSICA PELA COMPARAÇÃO ENTRE O EXPERIMENTO E O MODELO TEÓRICO	21
2.1 Modelo Predominante no Ensino de Física Experimental.....	21
2.2 Ciência Normal em Sala de Aula.....	26
2.3 A Função da Medição na Física Moderna por Thomas Kuhn.....	31
2.4 Experimentação como Concepção para a Aprendizagem de Modelos Conceituais.....	34
CAPÍTULO III - EXPERIMENTAÇÃO COM MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA	38
3.1 Modelagem Matemática.....	38
3.2 Laboratório Didático.....	43
3.2.1 Tipos de Abordagens no Laboratório Didático.....	45
3.2.2 Características das Medidas.....	49
3.2.3 Medição.....	50
3.2.4 Unidade de Medida.....	50
3.2.5 Grandeza Física.....	53
3.2.6 Mensurando.....	53
3.2.7 Erros.....	55
3.2.8 Erros de Medida.....	56
3.3 Modelagem Matemática no Ensino de Física.....	61
3.4 Modelagem Matemática como Estratégia de Ensino na Física Experimental..	63
CAPÍTULO IV - ANÁLISE DE RESULTADOS POR EXPERIMENTO	72
4.1 Método Hipotético - Dedutivo.....	72
4.1.1 Aplicação do Método.....	74
4.2 Tipos de Abordagem.....	75
4.3 Local.....	76

4.4 Sujeito	76
4.5 Categorias de Análise	76
4.6 Experimento de Teoria de Erro.	79
4.6.1 O Experimento.	79
4.6.2 Modelagem Matemática no Experimento.	79
4.6.3 Categorias de Análise.	83
4.7.2 Modelagem Matemática no Experimento.	84
4.7.3 Categorias de Análise	93
4.8 Experimento da Lei de Hook.	93
4.8.1 O Experimento.	94
4.8.2 Modelagem Matemática no Experimento.	94
4.8.3 Intervenções no Experimento.....	98
4.8.4 Análise dos Questionamentos.....	100
4.9 Experimento de Movimento Retilíneo Uniforme (M.R.U.)	105
4.9.1 O Experimento.	105
4.9.2 Modelagem Matemática no Experimento.	106
4.9.3 Intervenções no Experimento.....	109
4.9.4 Análise dos Questionamentos.....	111
4.9.5 Categorias de Análise.	113
4.10 Análise do Aluno como Cientista Normal nos experimentos	114
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
REFERÊNCIAS	122
APÊNDICE A - TABELAS ELABORADAS A PARTIR DOS DADOS MEDIDOS PELOS ALUNOS	127
APÊNDICE B - INSTRUMENTOS DE MEDIDAS E OBJETOS UTILIZADOS - ATIVIDADE TEORIA DE ERROS	129
APÊNDICE C - QUESTIONÁRIOS APLICADOS	131

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Em cursos de formação universitária, o laboratório de Física é tido como laboratório didático, com o objetivo de proporcionar ao aluno a execução de tarefas como a manipulação de experimentos e dispositivos (execução do experimento), a análise dos dados coletados (para proposição de um modelo matemático) e sua interpretação (validação do modelo proposto). Geralmente, estas atividades são executadas com base em um texto que serve de roteiro. Porém, mesmo contando com sua forte participação, o aluno tem limitada capacidade de observação devido às restrições impostas por estes roteiros e pela impossibilidade de modificar os experimentos.

Na atual estratégia de ensino e aprendizagem das disciplinas que utilizam o laboratório didático no ensino de Física, já se tem preestabelecido um modelo teórico que necessita de verificação experimental por meio das ações empíricas de manuseio, análise e interpretação. Ou seja, cabe ao aluno executar o experimento, apresentado como elemento principal a ser estudado. Isto traz como consequência grande incidência de erros, principalmente na interpretação e na comparação dos resultados das medições feitas com os resultados obtidos com a fundamentação teórica.

Há poucos estudos que associam a aplicação da Modelagem Matemática¹ no ensino de Física experimental. O objetivo do presente trabalho é fazer esta associação de maneira harmônica.

No contexto desta investigação, a Modelagem Matemática foi utilizada como metodologia de ensino: suas etapas consistem de um conjunto de ações que visam o entendimento de problemas reais, com vista à elaboração de modelos matemáticos que os representem e os resolvam adequadamente. Isto nos levou a adotar uma das abordagens disponíveis na literatura e proposta por Bassanezi (2009), por ser uma estratégia de ensino direcionada para uma ação empírica, que se encaixa nas atividades de um laboratório didático de Física. Da mesma forma, julgamos pertinente o emprego da abordagem de Chaves e Espírito Santo (2011), com as possibilidades de aplicação da Modelagem em sala de aula, que asseguram a independência do aluno durante o processo de aprendizagem. As duas

¹ Eventualmente, no decorrer do texto, o termo Modelagem Matemática poderá ser substituído por Modelagem.

abordagens são harmônicas: formam um conjunto coeso e propício ao ensino de Física por meio da experimentação.

Desta forma, aplicamos a Modelagem Matemática como estratégia de ensino nas disciplinas de Física experimental, associando o trabalho de experimentação com o modelo teórico. O aluno é levado ao entendimento dos conceitos físicos a partir dos resultados experimentais, para, em seguida, ser confrontado com o modelo teórico na busca de equivalência que leve ou que reforce a aprendizagem. Esta proposta é apresentada como paralelo entre modelo e medida, aplicado ao ensino experimental de Física.

Remonta a Kuhn (2011a; 2011b) a ideia de fazer um paralelo entre a experimentação e a teoria, com base em dois ensaios científicos. Esta concepção adaptada à sala de aula, mais especificamente ao laboratório didático de Física, é resultado do trabalho de Zylbersztajn (1991) e de Arruda; Silva e Laburú (2001).

Partimos dessas contribuições para investigar as ações dos alunos na condução de experimentos, independentemente dos modelos teóricos, com a expectativa de que haveria progresso na aprendizagem por parte dos alunos por meio dos processos de investigação, análise e reflexão.

Esta tese é composta de seis capítulos, que se apresentam desde a formulação conceitual utilizada até as conclusões da investigação.

No capítulo I, capítulo de introdução, são expostos: objetivo, objetivos específicos, hipóteses e justificativa para o tema proposto nesse trabalho, completando com a trajetória profissional do autor.

No capítulo II, é apresentada a fundamentação teórica. Inicialmente é feito um levantamento do atual modelo que predomina no ensino de Física experimental, para em seguida abordar a proposta de ciência normal em sala de aula e a função da medição na Física, propostas estas, baseadas nos trabalhos de Zylbersztajn (1991) e de Arruda; Silva e Laburú (2001), baseados na ideia de Thomas Kuhn (2011a; 2011b) a partir do ensaio *estrutura das revoluções científicas e tensão essencial* e que se complementa com o argumento da experimentação como concepção para a aprendizagem dos modelos teóricos. Estas propostas servirão de suporte teórico para a utilização da Modelagem Matemática como estratégia de ensino no laboratório didático de Física.

As abordagens adotadas para a Modelagem Matemática e o laboratório de didático de Física são apresentados no capítulo III. As propostas de Bassanezzi

(2009) e Chaves; Espírito Santo (2011) e o motivo da escolha levam em conta as características para o contexto do ensino de Física experimental. Para o laboratório didático, serão discutidos os conceitos de laboratório convencional, divergente, estruturado e não estruturado e o que melhor se adapta a esta proposta investigativa.

No final do capítulo, é apresentada a questão da modelagem matemática no ensino de Física, com apresentação das propostas vigentes de outros trabalhos que utilizam esta abordagem.

No capítulo IV, é feita uma exposição da metodologia utilizada na investigação do trabalho de tese. Optamos pelo método hipotético-dedutivo, por melhor se adaptar à natureza da pesquisa e com uma abordagem mista (quantitativa e qualitativa). Por meio de entrevista focalizada, uso de questionários e formulários, observação sistemática e laboratorial, os sujeitos da pesquisa, alunos dos cursos de Engenharia Civil e Licenciatura em Ciências Naturais da Universidade Federal do Pará, responderam a questões pertinentes à investigação. A escolha de quatro experimentos utilizados na pesquisa foi de acordo com o grau de complexidade dos modelos físicos, por considerar que assim é possível fazer um estudo mais criterioso do uso da Modelagem Matemática como estratégia de ensino.

Em relação à análise de resultados, optou-se por um estudo por experimento. A partir da obtenção dos dados coletados, foi feita uma análise quali e quantitativa nas respostas e atitudes dos alunos e no grau de intervenção do professor no decorrer da aula. Esses procedimentos foram necessários para a confirmação da hipótese do trabalho.

E, finalmente, no capítulo V, apresentamos as conclusões e perspectivas para futuros trabalhos.

1.1 Objetivo

Efetuar estudos de tópicos de Física Experimental com uso da Modelagem com o objetivo de comprovar a aprendizagem de conceitos físicos quando se compara a experimentação com o modelo teórico.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Efetuar avaliação de como se articulam conhecimentos físicos em um ambiente que associa a modelagem matemática com a experimentação;
- b) Investigar a aprendizagem de conceitos físicos por meio da comparação do experimento com o modelo teórico.

1.3 Hipótese

A aprendizagem de conceitos físicos é facilitada a partir da aplicação da Modelagem Matemática na experimentação.

1.4 Justificativa

As práticas experimentais, da forma como ainda são realizadas nos laboratórios didáticos de Física, tornam difícil a compreensão, por parte dos alunos, dos conceitos físicos. A metodologia, baseada numa concepção indutivista, consiste em submeter o aluno à prática do método científico, como atesta Rosa (2003, p. 16):

Em contraposição ao laboratório didático tradicional, é importante destacar as colocações de Pinho Alves (2000) que alerta para o expressivo uso do laboratório didático de Física, principalmente no ensino superior, como centrado no ensino do método científico, fazendo com que este espaço formativo ao invés de instrumento de ensino tenha tomado a conotação de objeto de ensino, que desvia a atenção do que de fato deve ser analisado e discutido no laboratório didático de física.

A maioria dos professores pratica o objeto de ensino ao ministrarem disciplinas experimentais no laboratório didático de Física, ou seja, o aluno é obrigado a seguir regras bem definidas, que acabam por determinar que a medida obtida a partir do experimento é a característica principal da aprendizagem. Como consequência, ocorrem bloqueios de entendimentos dos conceitos teóricos que retratam leis e teoremas.

Entendemos que, por formarmos alunos com a essência de experimentação, tais como engenheiros, químicos, físicos e geólogos, faz-se necessário apresentarmos uma concepção de ensino das disciplinas experimentais de Física, num nível que torne a interação do aluno com o laboratório mais forte, e o discente veja a experimentação em Física como essencial para a sua formação e, conseqüentemente, para a sua vida profissional.

1.6 Trajetória Profissional do Autor

O presente memorial analítico-descritivo tem como objetivo apresentar minha trajetória de formação até a presente data. Na elaboração deste documento, foram expostas as condições, as situações e as contingências que envolveram o desenvolvimento dos trabalhos. No decorrer de sua elaboração, procurei destacar os elementos relacionados com o tema que desenvolvi nos estudos de doutorado.

O presente memorial, ao mesmo tempo em que serve como instrumento de avaliação de minhas atividades, poderá ser visto como um instrumento relacionado às minhas potencialidades para concretizar o desejo de alcançar um patamar acadêmico mais elevado e desenvolver a capacidade de pesquisar novas estratégias para o ensino de ciências físicas.

Ingressei na Universidade Federal do Pará em 1986, com o vestibular para Engenharia Elétrica – opção Eletrônica. Em 1987, fui aprovado com a segunda colocação no vestibular de Licenciatura em Física, e como na ocasião não havia impedimento legal, cursei os dois cursos simultaneamente.

Em 1991, concluí o curso de Engenharia Elétrica e no mesmo ano optei por me transferir do curso de Licenciatura para Bacharelado em Física. Nesse meio tempo, exerci monitoria no Departamento de Física, atuando na disciplina Física III – Laboratório, sob a regência do Prof. Fortunato Gabai, no ano de 1988. Em 1993, concluí o curso de Bacharelado em Física.

Em julho de 1995, fui aprovado no concurso para professor auxiliar, no Departamento de Física do então Centro de Ciências Exatas e Naturais da UFPA. Neste mesmo ano, iniciei o curso de Mestrado na área de Física de altas energias, realizado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), tendo concluído em 1998 com a defesa da tese intitulada “*Relações de Dispersão Derivativa e Amplitudes Elementares em Interações Hadrônicas*”, sob orientação do Professor Dr. Márcio José Menon.

Atualmente, ocupo o cargo de Professor Adjunto IV lotado no Instituto de Ciências Exatas e Naturais. As disciplinas que lecionei desde 1995 até os dias atuais, para os cursos de Física Licenciatura e Bacharelado, Matemática Licenciatura, Química Licenciatura, Ciências da Computação, Engenharias Civil, Elétrica, Mecânica, Naval, Alimentos, Química, Sanitária, Geologia, Meteorologia e Oceanografia foram:

Física Fundamental I	Desenvolvimento da Física
Física Fundamental II	Física Geral
Física Fundamental III	Elementos de Física Básica I
Física Fundamental IV	Elementos de Física Básica II
Métodos da Física Teórica I	Física Aplicada I
Métodos da Física Teórica II	Física Aplicada II
Laboratório Básico I	Física Experimental Aplicada I
Laboratório Básico II	Física Elementar I
Física Básica I	Física Elementar III
Física Básica II	Prática de Física Elementar I
Física Básica III	Prática de Física Elementar III
Física Básica IV	Trabalho de Conclusão de Curso

Na pós-graduação, lecionei a disciplina “Física Computacional” para o Curso de Especialização em Ensino da Física, ofertada pelo então Departamento de Física, no ano de 2005. Na área da administração, exerci os seguintes cargos:

- a) Chefe do Laboratório de Informática da Física – 2002;
- b) Chefe do Laboratório de Física Ensino – 2002 a 2003;
- c) Chefe do Departamento de Física em dois mandatos -2003 a 2006;
- d) Coordenador das Bancas de Correção das Provas Analítico-Discursivas do Processo Seletivo Seriado da UFPA – 2007-2008;
- e) Representante Docente na Congregação do Instituto de Ciências Exatas e Naturais 2008-2009;
- f) Coordenador do Curso de Licenciatura em Física do Plano Nacional de Formação de Professores da Educação Básica (PARFOR) -2009-2011.

De 1999 a 2000, participei do Projeto de Pesquisa “*Fotoprodução e Eletroprodução Difractiva de Djatos e Altas Energias*”, coordenado pelo professor Dr. Alten Nascimento Pontes. De 2000 a 2001, participei do Projeto de Ensino “*Melhoria dos Textos do Laboratório de Físico Ensino*”, coordenado pelo professor MSc. Edimilson dos Santos Moraes, que permitiu a atualização dos roteiros de execução dos experimentos do Laboratório de Física. De 2007 a 2008, participei do Projeto “*Revitalização dos Experimentos e Interação Digital do Laboratório de Física Ensino*”, coordenado pelo professor MSc. José Luiz Magalhães Lopes, que propiciou

recursos para a compra de novos equipamentos para o Laboratório de Física do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da UFPA.

A razão da escolha do Programa de Pós-graduação em Educação em Ciências e Matemáticas do IEMCI origina-se da necessidade que tenho de uma complementação sólida na área de ensino de ciências. Na atual proposta da Pós-Graduação da UFPA, o IEMCI se apresenta como pioneiro ao disponibilizar um programa aberto às áreas das Ciências Exatas, inexistente em outros programas, e com imensas possibilidades de crescimento.

Adquiri grande entusiasmo ao participar dos primeiros contatos com o IEMCI a partir do primeiro semestre de 2010, cursando disciplinas da Pós-graduação, na condição de ouvinte quando vislumbrei ótimas perspectivas para a continuidade do meu trabalho acadêmico.

Atualmente, participo do Grupo de Estudos em Modelagem Matemática (GEMM), coordenado pelo Prof. Dr. Adilson de Oliveira do Espírito Santo, numa aproximação com o IEMCI, com o objetivo de realizar um trabalho de pesquisa na área de Modelagem Matemática e realização do doutorado.

Nesse período, ajudei na elaboração do novo projeto visual da *Home Page* do GEMM, que tem a finalidade de divulgar os trabalhos produzidos pelo grupo para o âmbito nacional e internacional, o que me permitiu escrever os artigos intitulados “Uso da Modelagem Matemática como Recurso Metodológico no Processo de Medidas do Circuito RLC” e “Modelagem Matemática no Ensino de Física Experimental”, apresentados nas VII e VIII Conferência Nacional sobre Modelagem na Educação Matemática (CNMEM), assim como o artigo “Bases Epistemológicas da Pesquisa sobre Modelagem Matemática em Contexto de Experimentação”, apresentado no IV Encontro Paraense de Modelagem Matemática (EPAMM). Esses artigos me permitiram uma grande interação com a área de Modelagem Matemática para efeito de aplicação nos conteúdos das disciplinas experimentais que vivencio no Laboratório de Ensino de Física da UFPA.

Vejo a pesquisa do ensino da matemática por meio da modelagem como precursora no desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias voltadas ao ensino de outras ciências, e pelo fato de estar intrinsecamente relacionada com a física, nos abre um horizonte de possibilidades de investigação que contribuirão para uma melhora do ensino e aprendizagem de fenômenos físicos por meio da área experimental.

CAPÍTULO II – ENSINO DE FÍSICA PELA COMPARAÇÃO ENTRE O EXPERIMENTO E O MODELO TEÓRICO

2.1 Modelo Predominante no Ensino de Física Experimental

O ensino de ciências por meio do laboratório didático de Física é considerado como um meio de aprendizagem que se utiliza da experimentação para comprovar leis e teorias, criando no aluno a mentalidade de que aprender ciências é seguir os passos da pesquisa científica.

O laboratório didático de Física é a sala de aula experimental, na qual o processo de investigação desses fenômenos é realizado. A respeito dele, Andrade, Lopes e Carvalho (2009, p.2) afirmam que:

O laboratório didático de física tem um papel importante na educação científica principalmente por colocar os estudantes em contato com os fenômenos descritos por leis e teorias que permeiam a ciência. Este ambiente é propício para que os estudantes testem suas hipóteses, indagações e curiosidades e que façam uso de sua criatividade, transformando assim o laboratório didático em um ambiente em potencial para o desenvolvimento de uma cultura científica capaz de proporcionar aos envolvidos uma visão mais completa da ciência.

Porém, o que se constata no modelo atual de ensino e aprendizagem no laboratório didático de Física é que, por meio dele, se busca desenvolver no aluno habilidades práticas, comprovação/verificação de leis e teorias que o auxiliem na compreensão de conceitos, assim como visa o ensino do método científico (ANDRADE; LOPES; CARVALHO, 2009). Numa investigação feita por Moreira e Ostermann (1993) sobre o ensino do método científico, apresentada nos livros didáticos de ciências e nas aulas de ciências, no qual incluímos o modelo atual do laboratório didático de física, destaca-se que:

- 1) o método científico começa na observação;
- 2) o método científico é um procedimento lógico, algorítmico, rígido; seguindo rigorosamente as etapas do método científico chega-se, necessariamente, ao conhecimento científico;
- 3) o método científico é indutivo;
- 4) a produção do conhecimento científico é cumulativa; linear;
- 5) o conhecimento científico é definitivo.

Nas atividades do laboratório didático de física, para o item 1, é embutida a ideia de que a aprendizagem começa com a apresentação do fenômeno, sem levar

em conta os pré-requisitos de conhecimento que o aluno já possui por experiência própria, enquanto que no item 2 permanece a rigidez de que as ações do método de pesquisa, extremamente bem definidas, são oriundas dos procedimentos científicos de pesquisa, o que, segundo Moreira e Ostermann (1993, p.114):

[...] fazer ciência é uma atividade humana, com todos os defeitos e virtudes que o ser humano tem, e com muita teoria que ele tem na cabeça. Conceber o método científico como uma sequência rigorosa de passos que o cientista segue disciplinadamente é conceber de maneira errônea a atividade científica.

Considerar o processo de aprendizagem indutivo, destacado no item 3, é outra característica do ensino experimental presente hoje nas disciplinas experimentais. Chega a ser comum, a partir de alguns experimentos físicos, que retratam um fenômeno em particular, obter leis e teorias científicas, de modo a induzir o aluno a pensar na facilidade de obter generalizações de teorias, segundo os procedimentos de observar, coletar dados, construir tabelas, traçar gráficos e induzir (na prática, fala-se em verificar ou redescobrir) alguma lei (MOREIRA; GONÇALVES, 1980).

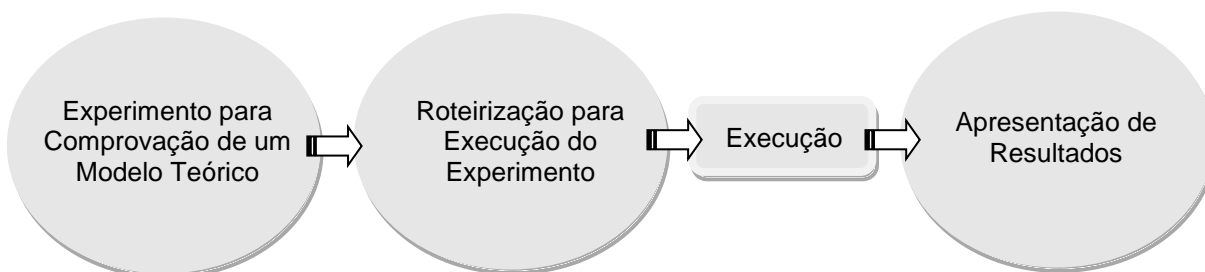
Nos itens 4 e 5, que considera o conhecimento científico cumulativo e definitivo, transmite-se a ideia de solidez com que se aprende. O aluno é induzido a pensar que a ciência é construída linearmente, sem rupturas e anomalias, tendo como consequência a aprendizagem de leis que são eternamente verdadeiras. Acerca desse pensamento, Moreira e Ostermann (1993, p. 115) alertam que:

É um erro ensinar ciência como se os produtos dela resultassem de uma metodologia rígida, fossem indubitavelmente verdadeiros consequentemente definitivos. O conhecimento científico que temos hoje está baseado em modelos e teorias inventadas que podem estar equivocados ou parcialmente corretos.

Portanto, na atual estratégia de ensino e de aprendizagem das disciplinas experimentais que são ministradas nos laboratórios didáticos de física, no ensino superior, observam-se pontos de desagrado, por parte de alunos e até mesmo professores. Segundo Thomas (2000), quando as atividades experimentais não são motivadoras, os alunos não veem interesse nelas, mesmo que para o professor sejam desafios intelectuais estimulantes.

A execução de um experimento físico, que ocorre numa disciplina experimental, segue as etapas constantes da Figura 1:

Figura 1 - Execução de um experimento no laboratório didático



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Ao adentrar no laboratório didático, o aluno já recebe um modelo teórico que buscará validar. Porém, as ações para a comprovação lhe são totalmente desconhecidas até a apresentação de um roteiro para, em seguida, executar o experimento. Na primeira etapa da Figura 1, relativo ao experimento, o aluno tem grandes dificuldades de realizar a transição entre o modelo teórico e o experimento adequado para validação. Na roteirização, ele é direcionado a seguir ações pré-definidas de execução com extremos detalhes de como se deve agir no ato de medir. Como consequência, são verificadas insatisfações como:

Falta de participação e interação entre pares;

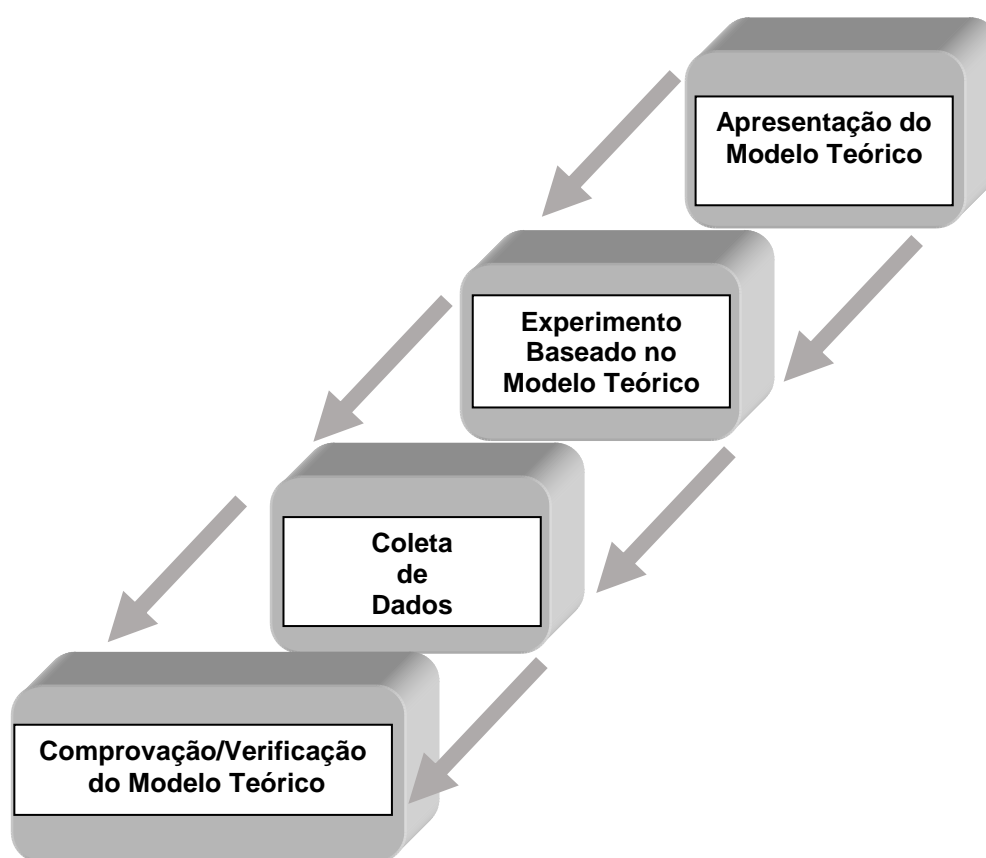
- a) Dificuldades de observações críticas no ato de medir;
- b) Dificuldades no entendimento da matemática com o experimento;
- c) Geração de erros devido ao comprometimento excessivo com os resultados esperados;
- d) Não entendimento em relação à necessidade da repetição de medidas para um tratamento estatístico dos mensurados.

Entre as causas das insatisfações vistas acima, podemos afirmar que o fato de considerarmos o experimento como elemento principal dessa demanda de ensino contribui, de forma considerável, para que o aluno sofra um processo de inibição de aprendizagem. Na Figura 2, apresentamos um resumo das ações atuais dos professores nas disciplinas experimentais de um laboratório didático de física. São percebidas quatro etapas que seguem uma ordem de execução, de modo que, se o

aluno não conseguir superar uma etapa, volta à etapa anterior ou recomeça do início a execução do experimento.

Essas regras são estabelecidas pelos professores que, de certa forma, impõem junto com os manuais ou roteiros, o tipo de metodologia a ser adotado nas disciplinas experimentais, não dando ao aluno qualquer opção de escolha que o faça ter um pouco de liberdade de ações para com a atividade de medida.

Figura 2 - Modelo atual das etapas da metodologia aplicada num laboratório didático de Física



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Nesse sentido, em parte dos laboratórios didáticos atuais, inexistem atividades investigativas abertas a ponto de o aluno ter mais liberdade de descobrir, manusear e propor por conta própria atos que facilitem o entendimento relativo à execução do experimento.

Num estudo mais detalhado da diferença entre um laboratório tradicional e ações mais abertas, Borges (2002, p.304 - 305) afirma que:

Quanto ao aspecto abertura, há existência de um contínuo, cujos extremos seriam: exercícios, de um lado, e problemas complementares abertos, do outro. Entre esses dois extremos que determinam quem tem o controle ou a responsabilidade por certas etapas da atividade prática, há um número de possibilidades com divisão dessas tarefas entre o professor e o estudante.

No ensino superior, mais especificamente nos laboratórios de Física da Universidade Federal do Pará, os procedimentos de coletas de dados mensuráveis para efeito de estudo de modelos, possuem um grau de abertura muito pequeno por quanto à capacidade de observar e investigar fenômenos físicos por parte dos alunos, tornando o conteúdo de aprendizagem padronizado.

Uma classificação das diferenças do laboratório tradicional com as atividades investigativas é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos aspectos de um laboratório tradicional e as atividades investigativas

Aspectos	Laboratório Tradicional	Atividades Investigativas
Quanto ao grau de abertura	Roteiro pré-definido (Restrito grau de abertura)	Liberdade no planejamento (Variado grau de abertura)
Objetivo do experimento	Comprovar leis	Explorar fenômenos
Atitude do aluno	Compromisso com o resultado	Responsabilidade na investigação

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Andrade; Lopes e Carvalho (2009).

Portanto, numa investigação aberta, é possível que os procedimentos e recursos oferecidos pelo professor sejam substituídos por ações mais flexíveis que possibilitem aos alunos: termos usados na sustentabilidade de investigação; planejamento das etapas; escolha dos procedimentos (seleção de equipamento e materiais, montagem experimental, realização de medidas); interpretação de resultados.

O uso da Modelagem Matemática como uma metodologia investigativa, como veremos mais adiante, torna as etapas dos experimentos de física mais flexíveis, com variado grau de abertura para que o aluno atinja os objetivos e aprimore seu compromisso com os resultados, fazendo com que tenha um melhor entendimento e desenvolva um pensamento crítico do significado da medida de um fenômeno físico.

2.2 Ciência Normal em Sala de Aula

No ensaio *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Thomas S. Kuhn (2011a) discute o desenvolvimento da ciência, mais especificamente a física, devido sua formação em Física teórica e posteriormente em História da Ciência.

Kuhn (2011a), inicialmente, define o conceito de paradigma como as leis e teorias das ciências aptas a fornecer problemas e soluções num determinado período.

Considero 'paradgmas' as realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções moderadas para uma comunidade praticante de uma ciência (KUHN, 2011a, p. 13).

Em seguida, ele destaca que a comunidade científica vale-se dos manuais e livros para aprender seus ofícios, com a ideia de que o conceito de ciência é originado da própria atividade de pesquisa, pelas observações de leis e teorias, descritas em suas páginas e que tem consequências na sua natureza e desenvolvimento.

Com quase igual regularidade, os mesmos livros têm sido interpretados como se afirmassem que os métodos científicos são simplesmente aqueles ilustrados pelas técnicas de manipulação empregada na coleta de dados de manuais, juntamente com as operações lógicas utilizadas ao relacionar esse dados às generalizações teóricas desses manuais (KUHN, 2011a, p. 20).

Esse compartilhamento e consenso com o paradigma faz com que o aluno seja preparado a tornar-se membro de uma comunidade que estuda os padrões e práticas científicas e que são pré-requisitos para ciência normal². Segundo Kuhn (2011a), o período de ciência normal é caracterizado pela firme crença no paradigma, de modo que num problema de pesquisa, a solução será atribuída à disposição do paradigma vigente. Kuhn (2011a) ainda identifica três classes de problemas da ciência normal:

- a) *Determinação de fato significativo* - construção de aparelhos de medidas que desenvolvem precisão, segurança e alcance dos fatos, revelados pelo paradigma (ex: posição e magnitude das estrelas, comprimento de ondas, condutividades elétricas);

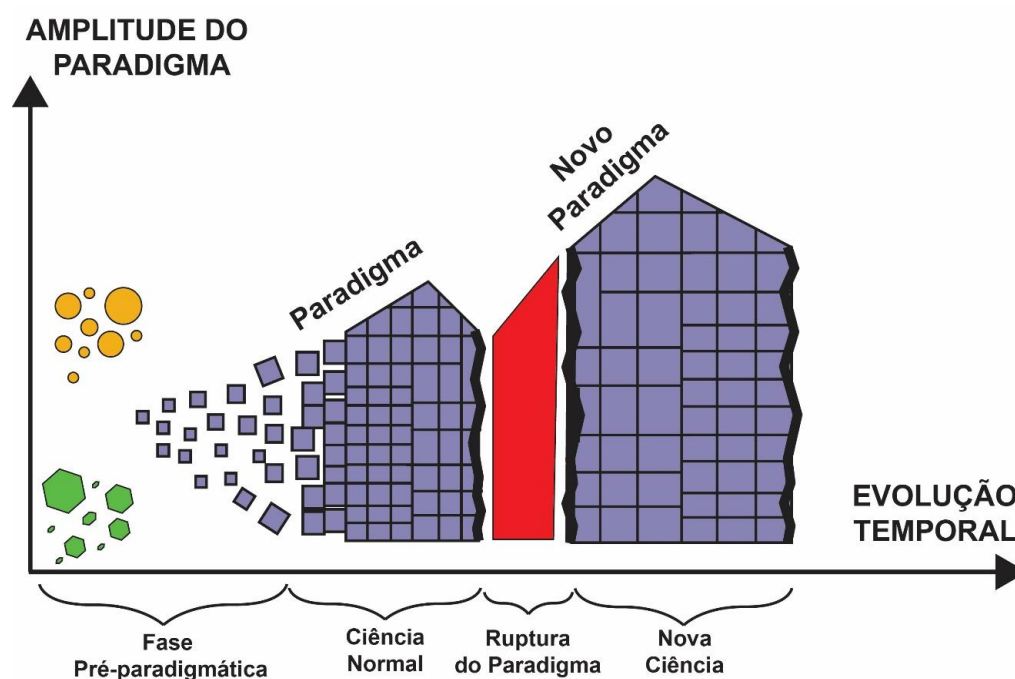
² Ciência Normal significa a pesquisa firmemente baseada em uma ou mais realizações científicas passadas. Essas realizações são conhecidas durante algum tempo por alguma comunidade científica específica como proporcionando os fundamentos para sua prática posterior.

b) *Adaptação da experimentação com a teoria* - dificuldade de uma teoria se adequar totalmente aos fatos gerados pelos fenômenos e o desenvolvimento de instrumentos de melhor precisão para que diminua a distância entre natureza e teoria (ex: construção de equipamentos para detecção de partículas previstas teoricamente).

c) *Articulação de teorias* - experimentos cujo objetivo é a medição de constantes físicas; reformulação de teorias a partir de articulações do paradigma, ou seja, uma teoria pode ser reformulada e aperfeiçoada ou descobertas outras versões equivalentes (ex: experiências de Boyle).

Partindo dos conceitos de paradigma e ciência normal, Kuhn (2011a) define a revolução científica quando, no decorrer da ciência normal, ocorrem anomalias na estrutura de uma teoria científica vigente (paradigma). O que poderia ser um problema comum, sua solução não se encaixa nas leis da ciência que ora vigoram. Como consequência, a comunidade científica, adepta deste formalismo, rejeita de imediato tal anomalia, embora os fatos sejam evidentes. Entretanto, logo se chega a um inevitável momento em que a anomalia é aceita e ocorrem investigações extraordinárias que convergem para uma nova base de conceitos científicos, novo paradigma, que substitui a teoria anterior.

Figura 3 - Ilustração da revolução científica por meio do conceito de paradigma e ciência normal



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das ideias de Kuhn (2011a).

Na figura 3, ilustramos o conceito de revolução científica. A fase pré-paradigma é constituída de várias escolas com concepções diferentes e que pretendem impor o pensamento e teorias dominantes na ciência. Passada essa fase, o paradigma dominante é aceito e o domínio da ciência normal, que atinge um pico máximo de validação para, em seguida, decair e entrar em colapso. Então, o paradigma anterior é substituído por outro e uma nova teoria prevalece.

Kuhn (2011a) apresenta exemplos clássicos de revoluções científicas que ocorreram na física, como: Copérnico, Lavoisier, Newton, Einstein e Maxwell. No quadro 2, Matheus (2005) faz um resumo de todas as revoluções citadas por Kuhn (2011a), no decorrer do ensaio e que abrange as áreas da física, química e biologia, com seus respectivos responsáveis pela ruptura do paradigma.

Quadro 2 - Exemplos de ciências paradigmáticas usadas por Kuhn (2011a).

Ciência	Época	Cientista (ou	Paradigma
Física	Filósofos gregos e a cultura helênica	Pitágoras Sócrates e Platão	Matemática, discussão crítica e a dialética
	Renascimento	Aristóteles Ptolomeu Francis Bacon René Descartes	Filosofia da natureza Teoria geocêntrica “Grande Instauração” “Discurso do Método”
	Revolução Copernicana	Ptolomeu X Copérnico, Galileo, Kepler	Teoria heliocêntrica
	Revolução na Física	Aristóteles X Newton	Princípios (ou leis)
	Teoria Eletromagnética	Maxwell, Lorentz, Fitsgerald	Descoberta do raio X
Física Moderna	Física Moderna	Newton X Einstein	Física Clássica X Teoria Geral da Relatividade
		Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger	Mecânica Quântica
Química	Revolução Química	Scheele, Priestley, Lavoisier	Teoria flogística X Descoberta Oxigênio
Biologia	Biologia Moderna	Charles Darwin	Teoria da Evolução das Espécies

Fonte: Matheus (2005).

Um ponto importante abordado por Kuhn (2011a) refere-se aos manuais (livros, textos, artigos, roteiros) que dão suporte para validação do paradigma que constitui a ciência normal. Os manuais são direcionados ao conhecimento aceito pela comunidade científica da época, excluindo detalhes de como foram inicialmente reconhecidos e posteriormente adotados. Baseados nas ideias de Kuhn (2011a), Vieira e Fernandez (2006, p. 7) afirmam que:

Os manuais, por serem os veículos pedagógicos por meio dos quais a maioria dos estudantes e/ou pesquisadores toma contato com o seu ramo da ciência pela primeira vez, proporcionam uma oportunidade ímpar de arrebatador seguidores para o paradigma vigente. O aluno que aceita a autoridade do professor (pesquisador experimentado que é) e o material que lhe é fornecido rapidamente tende a aceitar os exemplos e as descrições apontadas nos manuais como sendo provas indiscutidas e indiscutíveis das teorias que lhes são ensinadas.

Para que os manuais sejam substituídos, Kuhn (2011a) atesta que outra revolução científica tem de acontecer, a fim de que os conceitos de um novo paradigma prevaleçam. Estes novos manuais desprezam as teorias paradigmáticas anteriores e ressaltam as atuais.

Dessa forma, destacamos o quanto as ideias de Kuhn (2011a) enveredam no ensino de ciências, de modo que, segundo Zylbersztajn (1991, p. 1):

No que diz respeito ao ensino das ciências em geral, e da física em particular, a obra de Kuhn evidenciou as limitações da visão cumulativa e contínua da natureza do conhecimento científico, que ainda predominam na ciência curricular. A influência Kuhniana transparece também nos escritos de diversos pesquisadores que trabalham na temática das 'concepções alternativas', os quais têm apontado analogias entre o desenvolvimento conceitual em situações de aprendizagem e as ideias de Kuhn sobre o desenvolvimento do conhecimento científico.

Na abordagem proposta por Zylbersztajn (1991), a partir do ensaio de Kuhn (2011a), o aluno pode assumir duas identidades: *participando de uma revolução científica* ou *trabalhando nas condições da ciência normal*.

As duas etapas fazem parte de uma estratégia de ensino em que primeiramente o aluno é preparado a discutir questões problematizadoras, de acordo com suas concepções, a ponto que se introduza uma anomalia em suas crenças, estimulando os alunos a buscarem suas próprias soluções ou o próprio professor propor, de acordo com o nível dos alunos.

Na segunda etapa, o aluno é direcionado à resolução do problema, de acordo

com a teoria apresentada na etapa anterior ou uma atividade experimental como o planejamento e execução de experimentos para medidas de constantes físicas.

A primeira etapa é o *estágio de revolução conceitual*, enquanto que a segunda é o *estágio de articulação conceitual*. No Quadro 3, apresentamos um resumo da proposta de Zylbersztajn (1991), com sua definição de aluno como cientista Kuhniano.

Quadro 3 - Abordagem de Zylbersztajn (1991, p. 6-8), a partir do ensaio de Kuhn (2011a)

Aluno como cientista em uma revolução	
Estágio de revolução conceitual	<i>Elevação no nível conceitual:</i> Considerando que muitos dos alunos não se encontram plenamente conscientes de suas próprias concepções alternativas, a introdução de anomalias deverá ser precedida de uma preparação, visando a elevar o nível de consciência dos mesmos com relação às suas próprias ideias.
	<i>Introdução de anomalias:</i> Assim que os alunos estiverem conscientes de suas concepções, e mesmo sentindo-se à vontade ao aplicá-las, as anomalias poderão ser introduzidas.
	<i>Apresentação da nova teoria:</i> os alunos estarão agora preparados para receberem um novo conjunto de ideias que irão acomodar as anomalias.
Aluno como cientista normal	
Estágio de articulação conceitual	Neste estágio instrucional, os esforços devem ser dirigidos para a interpretação de situações e a resolução de problemas, de acordo com as novas ideias introduzidas; atividades experimentais. A principal vantagem deste tipo de trabalho prático relaciona-se com o fato de que ele é proposto tendo como referência uma teoria. Isto significa que não apenas habilidades experimentais podem ser aprendidas (o uso de equipamentos, a análise de dados, a elaboração de relatórios), mas que o referencial teórico pode ir sendo articulado e consolidado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Também em analogia, com o ensaio de Kuhn, baseado na problemática da ciência normal, Arruda; Silva e Laburú (2001, p.105) propõem as seguintes ações para um laboratório didático de física:

- 1) a exploração da parte fenomenológica do paradigma, o que poderia envolver a construção de equipamentos;
- 2) a produção de fatos que se ajustem com precisão a determinadas consequências do paradigma;
- 3) a articulação da teoria por meio da determinação de constantes físicas características, a descoberta de leis empíricas e medições em geral;
- 4) ou ainda, a resolução de uma anomalia, ou seja, de uma situação em que os conhecimentos prévios do aluno não estão funcionando, o que exigiria a construção de novos óculos teóricos, para permitir enxergar o experimento de uma outra maneira.

No Capítulo 3, mostraremos que as ideias de Kuhn, por meio da proposta de Zylbersztajn (1991), Arruda; Silva e Laburú (2001), considerando o aluno como cientista normal, encaixam-se no estudo de física experimental, usando a modelagem matemática como estratégia de ensino.

2.3 A Função da Medição na Física Moderna por Thomas Kuhn

A Física é uma ciência que mede grandezas a fim de confirmar um modelo teórico, cujo domínio de validade é definido pelo raio de ação dessas grandezas. Portanto, o papel da experimentação é vital para estabelecer o que definimos como uma lei Física. Como visto, Kuhn (2011a) apresenta esta ideia como parte da consolidação do paradigma no decorrer do período de ciência normal.

Nesse sentido, dando continuidade às ideias expostas na *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Kuhn (2011b), aborda o processo de medição dentro da coletânea *A Tensão Essencial* em que relata as etapas e características do experimental com a fundamentação teórica. Ele acredita que as técnicas quantitativas são as chaves essenciais para o sucesso do conhecimento, representado pelo paradigma. Por outro lado, também acredita que parte das ideias mais difundidas, na medição e sua eficácia, são atribuídas a mitos (KUHN, 2011b).

A fim de atribuir a um experimento como objeto de validação de leis, ou mais especificamente a relação teoria e experimentação, Kuhn (2011b) aborda três maneiras de se explicar fenômenos da natureza: *qualitativo* ou *não numérico*; *exploração de leis* (dividida em experimentação adaptada e independente); e *exploração de novas leis*. No primeiro caso, são experimentos demonstrativos de um

fenômeno que não gera dados numéricos, apenas alguns casos por observação. No segundo, Kuhn (2011b) associa o processo experimental à etapa de medição ou teoria quantificada, que são ações que originam números; na forma que um experimento se adapta à teoria a fim de comprová-la ou, de forma independente, sem qualquer adaptação, confirma a teoria. O terceiro tipo, segundo Kuhn (2011b), é o mais raro na ciência, quando a partir de resultados empíricos ocorre a exploração de novas leis (figura 4).

Figura 4 - Tipos abordagem de Thomas Kuhn para a relação da teoria com a experimentação



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das ideias de Kuhn (2011b).

Para um melhor aprofundamento das ideias propostas por Kuhn (2011b), consideremos a primeira abordagem, em que o processo de validação de uma teoria ou lei física tem sua confirmação por meio de experimento adaptável às condições propostas.

A Física experimental é executada pelo método científico, que é uma combinação de observação, raciocínio e experimentação (GOLDEMBERG,1970). O experimento é realizado a fim de se observar o fenômeno, que por meio da análise dos dados obtidos, faz-se uma hipótese, para que seja comprovada por outros experimentos, para então validar a hipótese como uma lei física que já foi previamente definida no campo da teoria.

Porém, cabe aqui especificar que o que definimos como uma lei física pode também ser considerada como um modelo, cujo domínio de validade restringe-se à própria limitação do experimento. Kuhn (2011b), enfatiza bem esse pensamento ao afirmar que a teoria reduz a dispersão dos resultados da medição. Para isso, são feitas aproximações essenciais de modo a adequar a teoria ao experimento, como no caso da medida do período no experimento do pêndulo simples em que:

[...] os fios do pêndulo de laboratório não são desprovidos de massa nem perfeitamente inextensíveis; a resistência do ar amortece o movimento da bola; a própria bola tem volume, o que levanta a questão de que ponto da bola deve ser utilizado no estabelecimento do comprimento do pêndulo. Se esses três aspectos da situação experimental são negligenciados, podemos esperar apenas a mais grosseira forma da concordância qualitativa entre a teoria e a observação (KUHN, 2011b, p. 207).

Uma característica enfatizada por Kuhn (2011b) é o caráter inexato da própria teoria, o que torna a imprecisão difundida no caráter da medida, ou seja, no processo de construção de uma lei física, são negligenciados determinados fatos, próprios da natureza, e que poderiam influenciar na sua compreensão. Condições consideradas na teoria, tais como: desprezo de atrito, vácuo imperfeito, escoamento irrotacional, gás perfeito, fazem com que os instrumentos utilizados na de medição forneçam apenas estimativas.

Logo, a adaptação do processo de medida, ao que se realmente se espera, faz com que o cientista tenha a real sensação de estar “confirmando” a teoria, de modo que:

Seu sucesso reside apenas numa demonstração explícita de uma concordância “previamente implícita” entre teoria e o mundo. Ele não revelou novidade alguma na natureza. Do mesmo modo, não podemos dizer que o sucesso do cientista “confirmou” a teoria que havia guiado sua pesquisa. Pois, se o êxito de seu empreendimento “confirma” a teoria, então sua falha teria de “infirmá-la”, e não é isso que ocorre nesse caso (KUHN, 2011b, p. 209).

Entretanto, é importante estabelecer que fazer aproximações a fim de adequar suas leis, não se trata de um procedimento consolidado na ciência, de modo que, conforme Kuhn (2011b), pode ocorrer o caminho inverso, ou seja, um experimento totalmente independente de aproximações que se adequam à teoria pode obter dados numéricos que a confirmam, ou também medidas obtidas a partir de determinadas situações empíricas originam novas teorias. Para ambos os casos, sustenta-se que são ocorrências raras na ciência.

Outra característica que Kuhn (2011b, p. 197) salienta na medição refere-se aos manuais:

Nossa imagem de ciência física e da medição é muito mais condicionada pelos manuais do que em geral nos damos conta. Essa influência é em parte direta: os manuais são a única fonte do primeiro contato com a física da maioria das pessoas. A influência indireta, contudo é muito maior e mais insidiosa.

Nos manuais dos processos de medida, os números que resultam de medições devem, obrigatoriamente, adequar-se à teoria:

Os fatos quantitativos deixam de ser apenas “o dado”. Devem ter propósitos a ser cúmplices numa luta em que a teoria a que serão comparados se revela a arma mais potente. Muitas vezes, os cientistas não podem obter números ajustados à teoria até que saibam quais são os números que devem forçar a natureza a fornecer (KUHN, 2011b, p. 210).

Nesse sentido, a indução dos manuais experimentais no ensino de Física é igual ao que Kuhn (2011b) critica, no intuito de obter resultados que apenas confirmem o modelo teórico, previamente exposto no início dos manuais.

Evidentemente que para um processo de análise e investigação no ensino de Física experimental, seguiremos a abordagem do aluno como cientista normal proposto por Zylbersztajn (1991), Arruda; Silva e Laburú (2001) e evitaremos a tese da qual a natureza da medida é de comprovação da teoria, e abordaremos que as características de manuseio de obtenção das medidas, pelo qual submeteremos o aluno, terão análise crítica de resultados, semelhante ao que o pesquisador realiza na exploração de novas teorias. Na próxima seção e no Capítulo 3, mostrarei como essas ideias se associam à Modelagem Matemática.

2.4 Experimentação como Concepção para a Aprendizagem de Modelos Conceituais

O ensino de conceitos físicos por meio da experimentação é cada vez mais consolidado na área de educação científica. A possível hipótese epistemológica para esse fato se justifica pelo estudo da cognição humana, ou seja, atuação dos cinco sentidos para executar uma tarefa experimental que reproduz um fenômeno da natureza e cujo efeito da aprendizagem se concentra no cérebro.

Nessa investigação, nos concentraremos apenas nas ações e resultados do processo experimental no ensino de um fenômeno físico e não em sua justificativa de como ocorre no nível da mente humana.

Cabe aqui adotarmos a experimentação como ações que visam observar, medir e analisar um fenômeno constituído de parâmetros pertinentes a sua validação.

Uma lei física, segundo o físico Horácio de Macedo (1976, p.28), é a “expressão de uma regularidade essencial que caracteriza um fenômeno ou um grupo de fenômenos”. Pela definição do prêmio Nobel de Física Richard Feynman (2008), é um ritmo e um padrão desses fenômenos. A lei pode ter ainda algumas vertentes, embora essas definições não sejam rígidas e necessariamente obedecidas tais como a regra (lei que é atribuída a determinados fenômenos que comportam várias exceções e aproximações), assim como a chamada lei empírica, que possui caráter experimental, porém não tem uma justificativa teórica ampla.

A Física é classificada em duas categorias: Física Experimental, que é definida pela medição de grandezas ou obtenção de dados numéricos de um determinado fenômeno; e a Física Teórica, que formula leis a serem verificadas experimentalmente. A dependência entre essas duas categorias é essencial para a validação de uma lei, devido às mesmas evoluírem a fim de que a Física Experimental necessite de justificativa lógica e a Física Teórica da fundamentação da medida.

Segundo Arruda; Silva e Laburú (2001), até o início do século XX houve um predomínio da chamada filosofia empirista, por meio de duas teses: (i) procedimentos indutivistas - leis e teorias generalizadas a partir de um fato plenamente observado; e (ii) comprovação experimental - leis e teorias que, obrigatoriamente, necessitam de comprovação empírica.

Segundo Bunge (2008), essa conexão da Física Teórica com a Experimental, a fim de validar uma lei (ou teoria) física, tem que, necessariamente, estar de acordo com quatro tipos de exames: metateórico, interteórico, filosófico e empírico (Quadro 4).

Quadro 4 - Tipos de exames, segundo Bunge (2008), para validação de uma teoria física

Tipo de Exame	Significado
Metateórico	Tem a ver com o significado lógico de uma teoria (forma e conteúdo coesos).
Interteórico	Compatibilidade com outras teorias previamente admitidas.
Filosófico	Composição com alguma teoria filosófica.
Empírico	Confronto da teoria com dados obtidos por observação e medida.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir das ideias de Bunge (2008).

Fazendo-se um comparativo dos quatro exames apresentados por Bunge (2008) com a duplicidade formada pelo ensino teórico e experimental de Física, no contexto atual, aplicado no laboratório didático, conseguimos identificar que são coisas semelhantes, principalmente na categoria empírica, que no atual processo de ensino de física experimental é abordada como validação da teoria por meio da observação e medida.

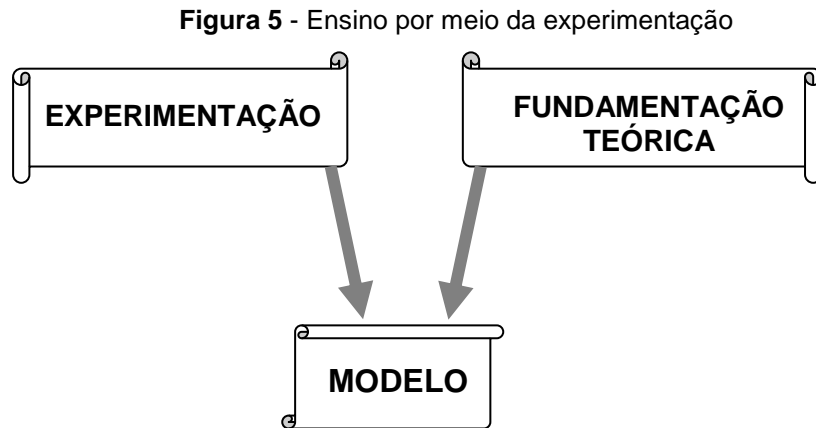
Na interpretação de Kuhn (2011b), para o desenvolvimento da ciência, teoria e experimentação são duas abordagens que se relacionam para a construção do paradigma, como afirmam Arruda; Silva e Laború (2001, p.98):

No sistema Kuhniano, a relação entre teoria e experimento não é, nem verificacionista, nem falseacionista, mas adaptativa. Ou seja, teoria e experimento não são independentes e antagônicos, mas contribuem ambos para a formação do paradigma.

Ou seja, na visão kuhniana, as medidas de ocorrência do fenômeno se adaptam à teoria e eventualmente a teoria se adapta à ocorrência, de modo que a ideia central proposta por Kuhn é que é necessário que ocorra ajuste ou transposição na relação de uma situação real e a fundamentação teórica, porém esses fatos não podem acontecer por meio de verificações e falseamentos.

Interpretações desse pensamento ao ensino de Física experimental nos leva a propor que é possível numa atividade de laboratório fundamentar a experimentação paralela ao modelo teórico a ser aprendido. A partir da coleta de dados, ocorre um processo indutivo a um modelo, a fim de mostrar o significado do que foi medido, ressaltando que teoria e prática se entrelaçam para a aprendizagem.

Entretanto, não é destacado que uma se sobressai à outra, ou que, uma verifica a outra (Figura 5).



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O processo de ensino por meio da experimentação, cujo objetivo é a aprendizagem de conceitos físicos, inicia-se com a apresentação do fenômeno e o instrumento de medida necessário a produzir dados, sem os manuais ou roteiros específicos. Nesta etapa, o aluno conhece o fenômeno e obtém dados experimentais, porém não possui o conhecimento teórico suficiente para entender a funcionalidade do que realmente está acontecendo. Eventualmente, ocorrem intervenções do professor para evitar erros de medidas e/ou ações para que no final esses dados obtidos tenham o caráter de entendimento do modelo que descreve o fenômeno.

CAPÍTULO III - EXPERIMENTAÇÃO COM MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA

3.1 Modelagem Matemática

O conceito de *modelo* não é explicitamente definido tanto nas teorias científicas quanto na teoria da educação. A ciência física, mais especificamente, baseia-se em teorias a partir de observações e medidas de fenômenos da natureza. Segundo Bunge (2008, p.15), “toda teoria específica é, na verdade, um modelo matemático de um pedaço da realidade”. Modelos aqui serão abordados na forma de descrição de fenômenos, por meio de uma linguagem matemática, em que é possível retratar suas características de funcionalidade. Evidentemente, que se trata de uma abordagem direcionada ao ensino das leis físicas que são utilizadas no propósito deste trabalho de investigação. Portanto, para efeito de um melhor entendimento, a partir dessa etapa, trataremos modelo como *modelo teórico*, considerado como leis e teorias da ciência física que descrevem um determinado fenômeno, do qual seu propósito é o de justificar sua funcionalidade, seja pela lógica matemática ou pela comparação com a experimentação.

Para Bassanezi (2009), os modelos matemáticos podem ser formulados de acordo com a natureza dos fenômenos e classificados pelo tipo de matemática envolvida, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação dos modelos conforme suas características

Tipo de Modelo	Característica
Linear ou Não Linear	Dependem das equações básicas.
Estático	Representa a forma do objeto.
Dinâmico	Variações de estágio do fenômeno.
Educacional	Baseado em pequenas ou simples suposições.
Aplicativo	Baseado em hipótese realística com grande número de variáveis.
Estocástico	Dinâmica dos sistemas em termos probabilísticos.
Determinístico	Suposição de informações suficientes para que o futuro do sistema possa ser previsto.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir das ideias de Bassanezi (2009).

Em nossa investigação, faremos uso dos modelos: linear, dinâmico, educacional e determinístico, por melhor se encaixar no processo de ensino dos conceitos físicos estudados num laboratório didático.

Como exemplo, o modelo que descreve o Movimento Retilíneo Uniforme (M.R.U.) de um corpo tem como modelo matemático a equação

$$x = x_0 + vt$$

que se trata de uma equação algébrica do primeiro grau nas variáveis (x e t), ou seja linear, que evolui conforme as características de movimento do corpo (dinâmico), podendo prever sua posição, conforme sua variação temporal (determinístico). O modelo do M.R.U. é classificado como um movimento simplificado da cinemática, de modo que quando é estudado não só no ensino médio, como superior, é atribuído um caráter de simplificação, ou seja, desprezam-se elementos que contribuem para o grau de fidelidade em relação à realidade, logo pela classificação do Quadro 5, o modelo é educacional.

Do exposto acima, consideraremos que os modelos utilizados em nossa investigação serão de caráter: Educacional, linear, dinâmico, determinístico e estocástico, devido à natureza dos fenômenos que deles resultarão e serão utilizados no ensino de Física experimental.

Vamos, nesse trabalho, considerar também o ambiente de um laboratório didático de física, como um ambiente de ensino de Física experimental para obtenção dos modelos teóricos (que também podem ser chamados de *modelos matemáticos*). É necessária uma ação definida como *modelagem matemática*, embora seu conceito não se limite apenas à obtenção de modelos, a modelagem matemática, segundo Bassanezi (2009, p. 35), “consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real”. De forma semelhante, Chaves e Espírito Santo (2011, p.13) definem a modelagem como:

[...] tradução/organização de situações problemas, provenientes do cotidiano ou de outras áreas do conhecimento, segundo a linguagem simbólica da matemática, fazendo aparecer um conjunto de símbolos ou relações matemáticas - Modelo Matemático - que procura representar ou organizar a situação problema com vistas a compreendê-las ou solucioná-las.

E, complementando o fato de que a matemática tem aplicabilidade nas ciências em geral, a modelagem matemática é estendida a outras áreas do

conhecimento, tornando-se inter e multidisciplinar, tanto na pesquisa quanto na educação, como metodologia que facilita o processo de ensino e aprendizagem. Esse pensamento é complementado por Bassanezi (2009, p.35) ao afirmar que:

A utilização da modelagem matemática como estratégia de ensino de diversas áreas do conhecimento constitui um processo dinâmico usado com o objetivo de obter ou validar modelos matemáticos a partir da seleção, representação e análise de fatores representativos da situação problema em estudo, abordando-os a trabalhar com a simplificação da realidade.

Em nosso trabalho de pesquisa, a Modelagem Matemática é tratada como estratégia no ensino experimental de física, de modo que desenvolva características de investigação e análise crítica no aluno cujo aprendizado se fará por meio de dados empíricos. Neste caso, a Modelagem Matemática é formada por possibilidades envolvendo determinadas etapas, conforme define Chaves e Espírito Santo (2011) (Quadro 6).

Quadro 6 - Proposta de Chaves e Espírito Santo (2011) da Possibilidade de Modelagem Matemática em Sala de Aula

ETAPAS DO PROCESSO	POSSIBILIDADE		
	1	2	3
Escolha do Tema	Professor	Professor	Prof. / Aluno
Elaboração da Situação-Problema	Professor	Professor	Prof. / Aluno
Coleta de Dados	Professor	Prof. / Aluno	Prof. / Aluno
Simplificação dos Dados	Professor	Prof. / Aluno	Prof. / Aluno
Tradução do Problema / Resolução	Prof. / Aluno	Prof. / Aluno	Prof. / Aluno
Análise Crítica da Solução / Validação	Prof. / Aluno	Prof. / Aluno	Prof. / Aluno

Fonte: Chaves e Espírito Santo (2011).

Na possibilidade 1, o professor é responsável pela escolha do tema, elaboração da situação-problema, coleta e simplificação de dados, dividindo com o aluno a etapa de resolução e validação da situação-problema. Na possibilidade 2, o

professor apenas escolhe o tema, cabendo ao aluno a coleta até a validação. Por fim, na possibilidade 3, o aluno assume todas as etapas desde a escolha do tema até sua validação, considerando-se que todas as etapas são acompanhadas e orientadas pelo professor.

O acompanhamento do professor se faz necessário como forma de desenvolver no aluno as características de investigação, como meta para o entendimento do conceito implícito no modelo. Chaves e Espírito Santo (2011, p.3) destacam que:

Atuar como mediador demanda do professor, dentre outras coisas, que ele coloque os alunos em situações que possam interpretar, explicar, justificar e avaliar o “melhor” modelo; que ele tenha ampla compreensão da diversidade de abordagens que os alunos podem adotar o que necessita saber ouvir os alunos em suas interpretações, organizações e explorações de modelos; que ele saiba oferecer representações matemáticas úteis às ideias dos alunos de modo que possam desenvolver suas ideias por meio de conexões com as representações anteriormente utilizadas e que ele domine um amplo espectro de intervenções pedagógicas.

Em nossa investigação, optamos pelo uso da possibilidade 2, visto que a aplicação da modelagem matemática se dá nas disciplinas experimentais de Física em que o aluno executa o experimento, coleta os dados, os avalia e os valida, cabendo ao professor a apresentação da situação-problema e um acompanhamento desde a execução até a validação, podendo ocorrer algumas intervenções para que se evitem desvios de medidas e/ou interpretações.

De forma semelhante, para Bassanezi (2009), a Modelagem Matemática é um conjunto de etapas utilizadas para obtenção e validação de modelos matemáticos, a partir de circunstâncias de um problema real. A Modelagem na situação de ensino e aprendizagem possibilita que alunos e professores adquiram determinadas peculiaridades, como estímulos e habilidades.

Ao propor um processo de Modelagem, originado a partir de um problema ou situação real, Bassanezi (2009) propõe cinco ações para sua execução: Experimentação, Abstração, Resolução, Validação e Modificação.

A *experimentação* é a ação de laboratório, em que os dados empíricos são tratados por meio de técnicas estocásticas e que facilitam a composição do modelo teórico.

A ação de *abstração* é dividida em quatro etapas: seleção de variáveis (definição das variáveis que agem no sistema), problematização (definição de um problema, pelo qual se busca a solução), formulação de hipótese (princípio a partir

do qual se pode deduzir um determinado conjunto de consequências; suposição, conjectura) e simplificação (reduzir a complexidade de um problema para condições de obter soluções matemáticas viáveis).

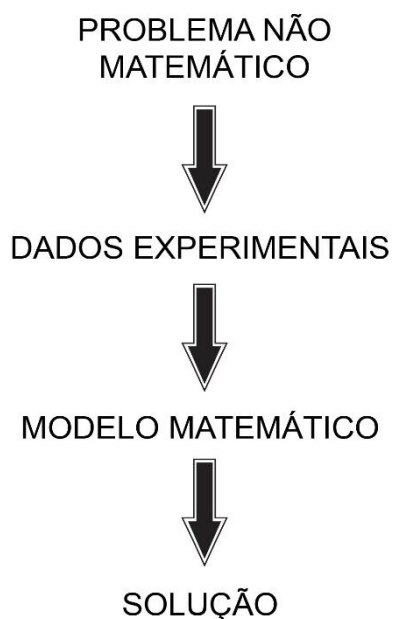
Na *resolução*, o problema (obtenção do modelo) é resolvido por uma solução matemática analítica ou aproximação numérica (computacional).

A *validação* serve para verificar se o modelo proposto pode ou não ser aceito. Este processo ocorre quando os dados experimentais se adequam à hipótese proposta para que o modelo seja viável ou necessite de uma melhor precisão nas medidas.

A ação de *modificação*, se necessário for, é a reformulação do modelo proposto, em razão de determinados fatores, como, por exemplo: hipóteses falsas ou insuficientes, dados experimentais inexatos, interpretação incorreta da teoria matemática.

Basicamente, o processo de Modelagem Matemática proposto por Bassanezi (2009) inicia-se com um problema não matemático, que passando por uma ação empírica, obtém dados experimentais (experimentação) e chega-se à solução via modelo matemático, que deve possuir coerência de solução do problema proposto (Figura 6).

Figura 6 - Proposta de Bassanezi (2009) para modelagem matemática



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Portanto, essas quatro ações são necessárias para o uso da Modelagem Matemática na medida de grandezas físicas, de modo que esta abordagem proposta por Bassanezi, somando-se à proposta de Chaves; Espírito Santo (2011), formam um conjunto teórico coeso e bem estruturado que abrangerá os objetivos desse trabalho no que se refere ao uso da Modelagem Matemática.

3.2 Laboratório Didático

Na literatura que pesquisa o ensino de Física, as atividades pedagógicas de laboratório ou ensino de Física experimental constituem uma das mais importantes ferramentas didáticas no ensino de ciências (AZEVEDO, 2009). Nesse sentido, Alves Filho (2000, p.174) afirma que:

A Física sempre esteve muito ligada aos procedimentos e práticas experimentais, tanto que se acredita que ela, dentre as Ciências Naturais, sempre foi - e continua sendo - aquela que tem uma relação bastante estreita com atividades ligadas ao laboratório. Este pensamento tornou-se tão fortemente arraigado, que levou à introdução do laboratório nos cursos de Física, pois se, para fazer Física, é preciso do laboratório, então, para aprender Física, ele também é necessário.

O laboratório didático de Física nos cursos superiores é um ambiente pedagógico propício ao ensino de Física. Nele, são realizados experimentos destinados à aprendizagem de conceitos e leis inseridos nos conteúdos das disciplinas experimentais de Física.

Atualmente, as estruturas físicas dos laboratórios didáticos são prédios próprios, contendo salas, consideradas como sublaboratórios que se destinam a áreas específicas do ensino de física, tal como no *Laboratório de Física Ensino* (LFE) da Universidade Federal do Pará, que é constituído de 6 (seis) sublaboratórios - 2 (dois) orientados ao ensino dos conteúdos de Física moderna, 2 (dois) aos conteúdos de mecânica, ondas e termodinâmica e 2 (dois) aos conteúdos de eletricidade. Desse modo, as disciplinas destinadas a cada sublaboratório estão inseridas no projeto pedagógico de cada curso, ou seja, uma disciplina como *laboratório básico I* tem a finalidade de atender aos cursos de ciências exatas (Engenharias e Licenciaturas de Física, Química e Matemática) cujo conteúdo experimental é de mecânica, ondas e termodinâmica.

Todos os sublaboratórios possuem equipamentos destinados exclusivamente

ao ensino de Física, sendo que os dois sublaboratórios de mecânica, ondas e termodinâmica foram os escolhidos para a aplicação e coleta de dados desse trabalho de Investigação. Como forma de entendermos melhor a função do laboratório didático no contexto do ensino, é apresentado no Quadro 7 uma categorização, conforme classificado por Alves Filho (2000) e adotado por outros autores.

Quadro 7 - Classificação dos Laboratórios Didáticos - Alves Filho (2000, p.175-177)

Tipo	Características
Laboratório de Demonstrações	O papel ativo é o do professor, enquanto ao aluno cabe a atribuição de mero espectador. A função básica destas atividades é ilustrar tópicos trabalhados em sala de aula. No entanto, não se excluem outras funções, tais como: complementar conteúdos tratados em aulas teóricas; facilitar a compreensão; tornar o conteúdo agradável e interessante; auxiliar o aluno a desenvolver habilidades de observação e reflexão e apresentar fenômenos físicos. Ferreira (1978) acredita que este tipo de experiência seja mais motivador para aqueles que as realizam (professores!) do que para os observadores (alunos).
Laboratório Tradicional ou Convencional	Ao se transferir a atribuição de manipular os equipamentos e dispositivos experimentais ao aluno, tem-se o laboratório tradicional, ou laboratório convencional. Geralmente a atividade é acompanhada por um texto-guia, altamente estruturado e organizado (tipo cook-book), que serve de roteiro para o aluno. Mesmo tendo uma participação ativa, a liberdade de ação do aluno é bastante limitada, assim como seu poder de decisão. Isto porque ele fica tolhido, seja pelo tempo de permanência no laboratório, seja pelas restrições estabelecidas no roteiro, seja pela impossibilidade de modificar a montagem experimental. Os experimentos, devido ao seu grau de estruturação, reduzem o tempo de reflexão do aluno, assim como a decisão a ser tomada sobre a próxima ação ou passo experimental. Variáveis a serem observadas e o que medir e como medir fogem totalmente da esfera de decisão dos alunos, pois tudo está "receitado" no guia ou roteiro experimental. Outra característica comum é que o relatório experimental é o "ápice" do processo. Tudo é dirigido para a tomada dos dados, elaboração de gráficos, análise dos resultados e comentários sobre "erros experimentais".

Laboratório Divergente	O laboratório divergente foi uma proposta que veio de encontro ao laboratório tradicional (ou convencional), pois não apresenta a rigidez organizacional deste. A ênfase não é a verificação ou a simples comprovação de leis ou conceitos explorados com exaustão no laboratório tradicional. Sua dinâmica de trabalho possibilita ao estudante trabalhar com sistemas físicos reais, oportunizando a resolução de problemas cujas respostas não são pré-concebidas, adicionado ao fato de poder decidir quanto ao esquema e ao procedimento experimental a ser adotado. O enfoque do laboratório divergente prevê dois momentos ou fases distintas: a primeira fase denominada de “exercício” é o momento em que o estudante deve cumprir uma série de etapas comuns a todos os alunos da classe. Esta etapa prevê a descrição detalhada de experiências a serem realizadas, os procedimentos a serem adotados, as medidas a serem tomadas e o funcionamento dos instrumentos de medida. O objetivo desta fase é a familiarização, por parte dos alunos, com os equipamentos experimentais e técnicas de medida. Ela visa muito mais a um treino e ambientação do aluno no laboratório, preparando-o para a segunda fase. Esta fase é denominada de “experimentação”. Agora, caberá ao aluno decidir qual atividade realizará, quais seus objetivos, que hipóteses serão testadas e como realizará as medidas. Após o planejamento, o aluno estabelecerá uma discussão com o professor, com o intuito de realizar eventuais correções e, principalmente, de viabilizar a atividade com o material
------------------------	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2014) a partir de Alves Filho (2000).

3.2.1 Tipos de Abordagens no Laboratório Didático

Das três classificações vistas acima é possível termos noção que tipo de laboratório didático se tem quanto à proposta do ensino de Física experimental no nível universitário, cujos objetivos visam um melhor entendimento dos fenômenos físicos. Porém, quanto às estratégias usadas para atingir estes objetivos, pode-se, sem muito rigor, dividi-las em *estruturadas* e *não estruturadas*.

[...] ‘laboratório estruturado’, dá ao aluno procedimentos detalhados, enquanto que, ‘laboratório não estruturado’, simplesmente especifica o objetivo e deixa o procedimento a cargo do aluno. Por exemplo, o laboratório estruturado enfatiza a verificação experimental dos princípios físicos enquanto que o não estruturado encorajaria a redescoberta desses princípios (MOREIRA, 1980, p. 368).

De modo semelhante e dando continuidade às abordagens apresentadas por Moreira (1980), Ribeiro; Freitas; Miranda (1997) apresentam três tipos de

abordagens para o ensino de laboratório, sendo elas: *programado*, *ênfase no experimento* e *sob um enfoque epistemológico*, que estão relacionadas com o conceito de *laboratório estruturado* e *não estruturado* (Quadro 8).

A primeira está relacionada à linearidade do ensino de laboratório didático, em que o aluno direciona suas ações numa atitude de passividade, sem qualquer interesse pelo real significado da medida. Uma das justificativas para tal atitude é um excessivo uso de textos (roteiros) que apresentam os objetivos e modelos conceituais como regras a serem seguidas, sem espaço para alternativas metodológicas.

As duas outras propostas, além de desenvolverem as características de habilidade de manuseio de aparelhos e aprendizagem da experimentação, libertam as ações do aluno e propiciam o mínimo de intervenção do docente, de modo a desenvolver, não só a um preparo para a pesquisa, como também uma maturidade acadêmica de buscar o conhecimento por conta própria. São abordagens, conforme veremos na próxima seção, que estão de acordo com o processo de modelagem matemática como estratégia do ensino de ciências, particularmente na Física experimental.

Quadro 8 - Tipos de laboratório no contexto do ensino e abordagem

Tipos Relativos à Abordagem (Ribeiro - 1997)	Tipos Relativos à Disposição (Moreira -1980)	Características
Ensino de Laboratório Programado	Laboratório Estruturado	Destina-se aos objetivos de propiciar a aprendizagem de habilidades de manuseio de aparelhos e a aprendizagem do conteúdo ministrado em sala de aula; os roteiros utilizam algum modelo de ensino como referencial teórico-pedagógico e possuem procedimentos bem detalhados.

Ensino de Laboratório com Ênfase na Estrutura do Experimento	Laboratório Não Estruturado	Destina-se aos objetivos de propiciar a aprendizagem de habilidades de manuseio de aparelhos, a aprendizagem de conteúdo ministrado em sala de aula e a aprendizagem da experimentação, levando o estudante a identificar a estrutura do experimento; os roteiros utilizam algum modelo de ensino como referencial teórico-pedagógico e os procedimentos não são detalhados.
Ensino de Laboratório sob um Enfoque Epistemológico	Laboratório Não Estruturado	Destina-se aos objetivos de propiciar a aprendizagem de habilidades de manuseio de aparelhos, a aprendizagem de conteúdo ministrado em sala de aula e a aprendizagem da experimentação, levando o estudante a identificar a natureza do conhecimento e como ele é produzido no laboratório; os roteiros utilizam algum modelo de ensino como referencial teórico-pedagógico e os procedimentos não são detalhados, apenas auxiliam a determinação da natureza do conhecimento, fornecendo um modelo heurístico que auxilia na compreensão da estrutura epistemológica dos experimentos.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Ribeiro; Freitas; Miranda (1997) e Moreira (1980).

É importante percebermos que nas três abordagens o roteiro se faz presente de forma direta. Na primeira, é considerado como instruções dos passos a serem seguidos para execução do experimento, a fim de se obter os resultados esperados, enquanto que na última, ele não apresenta detalhes, apenas auxilia nos procedimentos que se fazem necessários com a instrução do professor; os detalhes da execução são responsabilidade do aluno.

Atualmente, os roteiros do laboratório estruturado e programado seguem a seguinte ordem, relativa às etapas: Objetivo, Fundamentação Teórica, Material Utilizado e Atividade Experimental.

A primeira parte do roteiro é relativa à conceituação e começa com o *objetivo*, em que é apresentado, de imediato, qual grandeza se deve medir e/ou quais teorias e leis devem ser comprovadas, fazendo com que o aluno engesse o destino final de sua aprendizagem. Em seguida, na *fundamentação teórica*, é exposto um resumo do modelo teórico proposto pelo objetivo. Os teoremas e as leis são apresentados: alguns deduzidos de forma detalhada, outros apenas mostrados, para que o aluno siga uma trajetória que atenda exatamente o que se deseja ensinar.

Na segunda parte, inicia-se a experimentação com a apresentação do *material utilizado*, que nada mais são que os instrumentos de medidas e acessórios necessários à execução do experimento. Trata-se de um processo bem direcionado ao resultado, obrigando o aluno a ter uma atitude passiva com sua aprendizagem, conforme relata Ribeiro; Freitas; Miranda (1997, p. 446).

Os alunos, simplesmente, seguem um roteiro tipo “receita”, pronta e acabada, para obter resultados já esperados, sem nenhuma reflexão sobre o experimento, não levando, assim, a atender o objetivo da ilustração e facilitação do conteúdo ministrado na aula teórica, o que os leva a assumirem uma postura de observadores externos àquela experiência que está sendo feita.

Entretanto, que fique bem claro que não estamos descartando o roteiro por completo ou o elegendo como culpado único pelo desgaste do processo de ensino experimental no laboratório didático. Apenas o apresentamos como um modelo que gera fissuras no processo de ensino empírico, podendo ele ser remodelado, como apresentado no laboratório não estruturado com ênfase na estrutura do experimento e sob o enfoque epistemológico.

É evidente que um dos objetivos principais do roteiro é a funcionalidade do experimento, ou seja, dependendo do grau de complexidade do instrumento, é necessário um texto de orientação que facilite seu manuseio e não comprometa os dados coletados com os chamados erros aleatórios e sistemáticos.

Quanto aos tipos de experimentos utilizados num laboratório didático de física, Azevedo (2009) fez uma classificação para seu estudo relativo ao uso do experimento no ensino de física. Trata-se de uma classificação que varia conforme a abordagem, grau de complexidade, funcionalidade e aspectos históricos (Quadro 9), e que também podem ser inseridos no contexto dos laboratórios estruturados e não estruturados, assim como nas abordagens propostas por Ribeiro; Freitas; Miranda (1997), apresentadas no Quadro 8.

Quadro 9 - Tipos de laboratório no contexto do experimento

Tipos de Experimentos	Características
Demonstrativos (D)	Experimentos demonstrativos com aparatos de montagem simples (DS): propostas de atividades experimentais de caráter demonstrativo, a partir de montagens experimentais simples, utilizando-se, muitas vezes, de sucatas e de objetos do cotidiano.
Quantitativos (Aparatos de Montagem Simples) (Q)	Propostas a partir de aparatos que podem ser montados por professores do ensino médio. Nesta categoria, enquadram-se as propostas que buscam realizar medições a partir dos aparatos montados.
Quantitativos (Aparatos de Montagem Sofisticados) (QS)	Aparatos experimentais mais sofisticados e precisos, tais como aqueles utilizados nos laboratórios de Física básica das universidades, produzidos por firmas conceituadas. Nesta categoria, encontram-se ainda as propostas com as famosas fichas de laboratório com roteiros prontos, nos quais os passos das atividades já estão programados.
Problematizadores (P)	Nesta categoria, enquadram-se as atividades experimentais que se baseiam numa proposta de ensino investigadora. Neste caso, o experimento tem um papel importante como ponte de ligação entre os conteúdos que se quer ensinar e os conhecimentos e experiências que os alunos possuem, materializados através de suas interpretações.
Reconstruções de Aparatos Históricos (RH)	Nesta categoria, se inserem atividades a partir de reconstruções de experimentos históricos, fidedignas ou híbridas.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Azevedo (2009).

3.2.2 Características das Medidas

Definidos tipos, peculiaridades e abordagens do laboratório didático de Física, passamos então às características das medidas, que estão relacionadas ao resultado obtido na coleta de dados, a partir do instrumento de medida e que são

constituídas por: *medição*, *grandeza física*, *medição numérica* e *unidade de medida* (Figura 7).

Figura 7 - Constituição do processo de medida



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

3.2.3 Medição

A medição teve início com o ato do ser humano de contar (quantificar as coisas). Associar os números a um elemento deu significado à quantidade, ou seja, algumas necessidades quotidianas, como o número de alimentos, membros da família, temperatura ambiente, são associados com um valor numérico a fim de que sejam úteis para a vida do homem.

Para um completo entendimento da medição, é necessário conhecer o conceito de *unidade de medida*, *grandeza física* e *mensurando*. Estes entes físicos dão o real significado ao ato de medir na Física experimental.

3.2.4 Unidade de Medida

A *unidade de medida*, ou simplesmente *unidade*, é um padrão de medida que está associada a uma entidade física. Ao longo da evolução humana, o homem sentiu necessidade de aprimorar seus sistemas de medidas, até então composto apenas da quantificação numérica. Uma das primeiras unidades definidas foi para o comprimento, baseado inicialmente na anatomia humana, tais como o tamanho dos pés, cabeça, distância entre membros. Em seguida, foram aprimoradas para distâncias geográficas, como por exemplo, as distâncias entre determinados países europeus. E, finalmente, nos dias atuais, que está baseado na estrutura de elementos da natureza.

De início, as unidades não eram padronizadas internacionalmente e determinados países tinham suas próprias unidades de medida, até que, com a evolução da metrologia (ciência das medições), em 1960, na 11ª Conferência de Geral de Pesos e Medidas, decidiu-se por um novo Sistema Internacional de

Unidades (SI), que foi adotado progressivamente em escala mundial (CREASE; SCHLESINGER, 2011).

No SI, as unidades são classificadas em *unidade de base*, *unidades suplementares* e *unidades derivadas*. Unidades de base são entes físicos fundamentais que não derivam de outras unidades. O valor da maioria das unidades básicas é constante, embora algumas tenham sofrido alterações com o tempo. Um exemplo típico é o *metro*, que até 1983 era definido como 1.650.763,73 comprimentos de ondas da raia alaranjada da luz da lâmpada de criptônio 86, que foi substituída pelo atual modelo, baseado no comprimento que a luz percorre em um dado intervalo de tempo quando viaja no vácuo.

Evidentemente que como em todo processo de medida o valor final está associado a uma incerteza (erros de medidas, que definiremos na próxima Seção), isso faz com que essas unidades possam alterar seu valor de acordo com o aprimoramento dos métodos de medidas, ou até mesmo pela ação do tempo. Um problema típico é a massa, pelo fato de ser a única entidade física que não depende de um método empírico para ser definida, convencionou-se um artefato físico (protótipo internacional do quilograma) como referência. Com o passar do tempo, constatou-se que este objeto começou a sofrer desgaste, isso fez com que a comunidade científica pesquisasse um modo de obter um padrão para massa sem estar baseado num objeto físico. Até o momento, é um problema aberto.

Para complementar as unidades de base, são acrescentadas mais duas unidades de natureza matemática, que são definidas como unidades suplementares: ângulo plano (radiano - rad) e ângulo sólido (esterradiano - sr). No Quadro 10, estão as sete unidades de base, segundo o Sistema Internacional de Unidades (SI) (ALBERTAZZI JÚNIOR; SOUSA, 2008).

Portanto, as sete unidades de base mais as duas unidades complementares são suficientes para originar qualquer outra unidade, que é definida como unidade derivada, ou seja, qualquer unidade física, que não é classificada como básica e suplementar, é o resultado da combinação dessas unidades. Como exemplo, citemos a força mecânica, cujo símbolo é o Newton (N) e tem como combinação de unidades de base o comprimento (m) a massa (kg) e o tempo (s^{-2}).

Quadro 10 - Unidades de Base do Sistema Internacional de Unidades (SI)

ENTIDADE FÍSICA	DEFINIÇÃO DE UNIDADE	SÍMBOLO	INCERTEZA
Comprimento	O <i>metro</i> é o comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vácuo, durante o intervalo de tempo de 1/299.792.458 do segundo.	m	10^{-12}
Massa	O <i>quilograma</i> é a unidade de massa que é igual à massa do protótipo internacional do quilograma.	kg	2×10^{-9}
Tempo	O <i>segundo</i> é a duração de 9.192.631.770 períodos de radiação da transição dos níveis hiperfinos do átomo de césio 133.	s	10^{-15}
Intensidade de Corrente Elétrica	O <i>ampère</i> é a intensidade de uma corrente elétrica constante.	A	9×10^{-8}
Temperatura Termodinâmica	O <i>kelvin</i> é a fração 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto triplice da água.	K	3×10^{-1}
Intensidade Luminosa	A <i>candela</i> é a intensidade luminosa numa dada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz.	cd	10^{-4}
Quantidade de Matéria	O <i>mol</i> é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilograma de carbono ¹² .	mol	2×10^{-9}

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Albertazzi Júnior; Sousa (2008).

3.2.5 Grandeza Física

A *grandeza física* é um elemento sujeito a um processo de medida com o objetivo de facilitar o estudo e a descrição de fenômenos físicos. Classifica-se em *grandeza extensiva* e *grandeza intensiva*.

A grandeza de um sistema físico é extensiva quando existir uma dependência direta (proporcional) em relação à massa, ou seja, o sistema depende da quantidade de matéria, como, por exemplo, a energia, enquanto que na grandeza intensiva não ocorre dependência em relação à massa, como, por exemplo, a temperatura.

Um conceito mais abrangente da grandeza física é considerarmos uma composição de uma quantidade numérica com sua unidade. Portanto, admitindo G uma grandeza física qualquer e $U(G)$ sua unidade equivalente, a medida numérica $m(G)$ é o resultado da comparação de G com a unidade U e é definida como a *medição* da grandeza G .

$$G = m(G) U(G).$$

Como exemplo, consideremos a medida de uma força (F) de 7 Newtons (N).

$$F = 7 N$$

$$G \rightarrow F, \quad m(G) \rightarrow 7, \quad U(G) \rightarrow N.$$

3.2.6 Mensurando

O *mensurando* é a descrição de uma grandeza física baseada num processo de medição. Comumente, o mensurando só tem significado se forem considerados certos estados e condições físicas.

Como exemplo de um mensurando, a medida da velocidade do som no ar seco. As informações das medidas são: composição (fração molar) $N_2 = 0,7808$, $O_2 = 0,2095$, $Ar = 0,00935$ e $CO_2 = 0,00035$, na temperatura $T = 3,15$ K e pressão $P = 101325$ Pa.

Sendo assim, o mensurando depende de várias informações contidas no processo de medidas, em conformidade com o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição (GUM) (BARATTO, 2012, 49):

Assim, na medida em que deixa margem a interpretação, a definição incompleta do mensurando introduz, na incerteza do resultado de uma medição, um componente de incerteza que pode ou não ser significativo para a exatidão requerida da medição.

Mensurando e grandeza física são conceitos representativos um do outro.

Retornando ao conceito de medição, conforme define Albertazzi Júnior; Sousa (2008, p. 3):

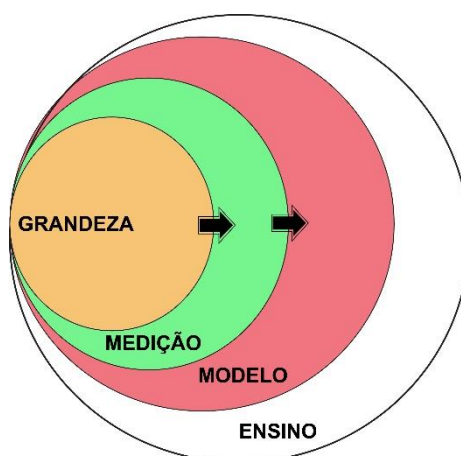
Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente.

A medição como uma atitude técnica para a medida de fenômenos físicos é classificada em três ações: monitorar, controlar e investigar.

Monitorar é observar e registrar o valor de uma grandeza, que pode ser momentânea ou acumulativa. Controlar é observar, registrar e agir para manter os valores da grandeza num determinado limite predefinido. Investigar é pesquisar a natureza da grandeza, de modo que sua medida de um significado a um modelo teórico obtenha conhecimentos de situações reais.

A investigação por meio da medida de grandezas também é associada ao ensino de ciência experimental. O modelo atual é constituído de etapas que fazem dessa medida o elemento principal do modelo a ser ensinado, que por sua vez está associado ao conteúdo das disciplinas (figura 8).

Figura 8 - Processo de medição da grandeza até o modelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

3.2.7 Erros

O processo de medição de uma grandeza física é um conjunto de procedimentos que visam obter resultados numéricos. Por mais cuidadosas que sejam as realizações das medidas, ocorrem desvios nos resultados, não sendo possível obter um valor “verdadeiro” que descreva por completo a grandeza. Esses desvios nos resultados são definidos como *erros* ou *incertezas*.

O erro como elemento de investigação no processo de aprendizagem experimental será aqui classificado como: *erro de medida*, *erro de ação* e *erro de investigação*. Ao se considerar dados empíricos com conotação de medidas científicas, suas incertezas são tratadas como erros de medidas, enquanto que as ações relativas à execução do experimento, assim como a análise dos resultados que não estão de acordo a validação da teoria, são tratados como erros de ação e investigação, respectivamente.

Nas disciplinas experimentais de física, o ato de medir, inicialmente faz-se pelas ações, com o preparo do experimento por meio da montagem adequada ao problema proposto. Nessa etapa, é comum que aconteçam falsas interpretações da concepção da teoria, modelo teórico a ser estudado, com a armação do experimento que reproduzirá dados. Alguns experimentos, depois de executados, não produzem resultados adequados à análise de validação da teoria, nesse caso podem ter ocorrido *erros de ações*, por parte do executor, tais como: montagem inadequada do experimento, inabilidade de manuseio e falta de critério para medir as unidades físicas. Em seguida, os dados obtidos são submetidos à avaliação matemática, por meio de processos estatísticos, obtendo o chamado intervalo de incerteza, e não um valor único, supostamente verdadeiro para com a medida.

Essa incerteza é considerada um *erro de medida*, de modo que não se trata de um equívoco mutável, pelo fato de jamais ser possível eliminá-la por completo. Por último, os dados são analisados e confrontados com o modelo teórico, de modo a obter coerência na medida, sendo que para isso é necessário um entendimento de natureza cognitiva na explicação dessas medidas, de modo que não se tenham falsas conclusões. Nessas ações estão embutidos os *erros de interpretação* que podem ocasionar análises diferentes do contexto da aprendizagem por meio do experimento.

Quando da execução do experimento que mede a grandeza física, dividiremos em três etapas: montagem, execução e análise. Cada tipo de erro abrangerá uma ou duas dessas etapas, facilitando assim a identificação de cada um quando no uso da Modelagem (figura 9). De início, na montagem do experimento até sua execução, adotaremos os erros de ação, enquanto que especificamente na execução os erros de medidas, e por fim, da execução até a análise de dados, os erros de investigação.

Figura 9 - Convenção para investigação dos tipos de erros na execução do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Esta convenção é meramente qualitativa no sentido que nos pareceu mais conveniente ao estudo dos erros. Evidentemente que o conceito de erro pode ser entendido de formas mais abrangente, porém, em nosso processo investigativo, nos pareceu adequado delimitarmos essa investigação às ações que comumente comprometem o processo de ensino dos conteúdos experimentais de física e que melhor podem ser estudadas com o uso da Modelagem Matemática, a fim de se obter resultados práticos.

3.2.8 Erros de Medida

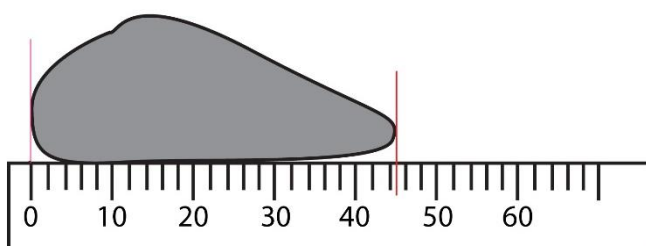
O processo de medida que adotamos nas disciplinas experimentais de física será por meio da medição repetida. Trata-se da técnica de realizar várias medidas de uma grandeza de modo que seus valores numéricos orbitem em torno de um valor fixo e seja possível, por meio de tratamento estatístico, obter resultados confiáveis, mas nem sempre é possível obter esses resultados de forma a estarem de acordo com o real objetivo do experimento. Portanto, trata-se de duas situações

distintas que estão submetidas a ações empíricas em que ocorrem erros de medidas definidas como *erros aleatórios* e *erros sistemáticos*.

Os *erros aleatórios* (ou estatísticos) são variações aleatórias no resultado das medições que não se tem como controlar ou que, de certa forma, não foram monitoradas. Os erros aleatórios podem ser detectados pela repetição da experiência. Um operador, por mais cuidadoso que seja, poderá obter diversas medidas para uma mesma grandeza física; isso se deve a vários fatores de flutuação que podem estar relacionados a causas identificáveis ou na maioria dos casos indeterminadas, podendo o erro ser submetido a um tratamento estatístico (teoria dos erros) para uma melhor exatidão do valor da grandeza estudada.

Consideremos um operador que deseja fazer uma medida do comprimento de um objeto com uma régua metálica (figura 10):

Figura 10 - Medição de um objeto por uma régua metálica



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O operador percebeu que a medida localiza-se entre duas escalas (44 e 46), podendo escolher, por interpolação (processo de estimação de posições entre marcações de escalas), uma variedade de valores tais como: 44,5; 45,0; 44,30; 44,20; de tal modo que essas medidas formam um conjunto aleatório de dados que podem subestimar ou sobrestimar o valor do comprimento. Ao aumentar o número de dados de leitura, o erro aleatório diminui, porém jamais poderá ser anulado.

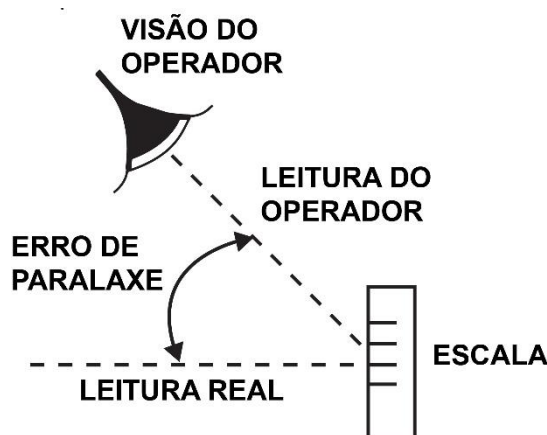
Os *erros sistemáticos* são ocorrências no valor da medida da grandeza física que, na maioria das vezes, são de causas identificáveis e originadas por: erro do operador, deficiência (calibragem) do experimento e influências do meio ambiente. Estes são erros cujo valor da amplitude varia num mesmo sentido: ou para mais ou para menos. Portanto, diferente do erro aleatório, não é possível fazer uma análise estatística dos erros sistemáticos.

Consideremos um cronômetro, responsável pela medida do período na experiência do pêndulo simples: caso ele esteja descalibrado em 1,5 segundos, todas as medidas feitas terão um erro de amplitude numérica de um fator 1,5 (para mais), fazendo estes valores ficarem deslocados de seu real valor. No caso do exemplo (figura 10), considerando que o ambiente sofra uma brusca variação de temperatura de modo que a régua altere seu comprimento por meio de uma pequena dilatação em 1 milímetro, logo todas as medidas feitas por essa régua terão seu valor ampliado em uma unidade numérica. Tanto no exemplo do cronômetro quanto da régua, são erros sistemáticos identificáveis e que podem ser corrigidos.

Porém nem sempre a diferença entre erros aleatórios e sistemáticos são identificáveis, o que for erro aleatório num experimento pode ser um erro sistemático em outro, como, por exemplo, o erro de paralaxe.

O *erro de paralaxe* é um desvio que ocorre quando a visão está deslocada da linha reta central de observação (leitura real), conforme figura 11.

Figura 11 - Erro de paralaxe na leitura de uma escala



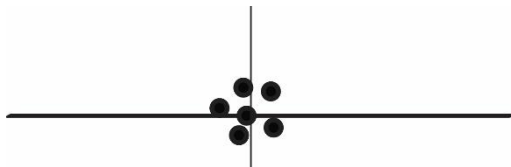
Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Em determinado experimento, o operador se desloca de um lado para outro em relação à linha reta central de observação, ocasionando um erro aleatório (valores positivos e negativos), enquanto em outro experimento o operador está deslocado todo para a direita ou para a esquerda, ocasionando erro sistemático, devido os valores da medida terem amplitudes todas positivas ou negativas.

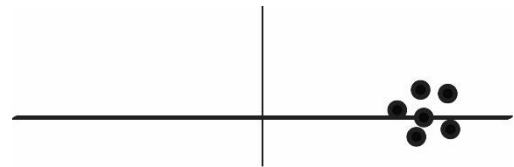
Nos gráficos da Figura 12, podemos melhor distinguir a diferenças entre erros aleatórios e sistemáticos. A interseção das retas horizontal e vertical representa o valor real (alvo da medida) a ser obtido de uma determinada grandeza física, enquanto que os círculos pretos são valores medidos pelo operador.

Na opção (a), os pontos estão concentrados no alvo da medida, ocasionando erros aleatórios e sistemáticos baixos, considerando esta, a situação ideal para obtenção de dados experimentais. Na situação (b), ocorreu um deslocamento conjunto do valor das medidas em relação ao alvo, devido a uma alta existência de erros sistemáticos; porém, as flutuações são pequenas, indicando baixo erro aleatório. Em (c), ocorre uma grande dispersão dos valores em torno do alvo de alta amplitude (positiva e negativa) com um pequeno deslocamento, configurando erros aleatórios altos e sistemáticos baixos. Em (d), uma grande defasagem de valores, por meio de deslocamento e amplitude, caracteriza erros aleatórios e sistemáticos altos.

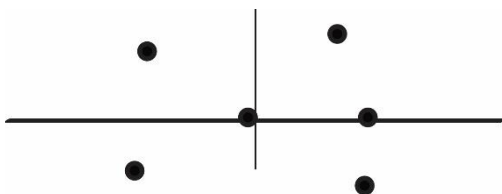
Figura 12 - Erros aleatórios e sistemáticos em relação a um alvo de medidas



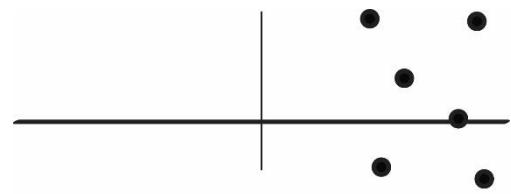
(a) Erro aleatório baixo,
erro sistemático baixo



(b) Erro aleatório baixo,
erro sistemático alto



(c) Erro aleatório alto,
erro sistemático baixo



(d) Erro aleatório alto,
erro sistemático alto

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Porém, é importante percebermos que nem sempre se tem noção do valor verdadeiro de uma medida física, devido à incerteza de sua natureza. Nesse caso, o alvo de referência das medidas não existiria e não teríamos a noção de quanto o valor medido estaria deslocado, tornando a identificação do erro sistemático impossível de detectar. Se imaginarmos (a), (b), (c) e (d) da Figura 12, sem as retas verticais e horizontais, facilmente identificaríamos os erros aleatórios, porém não teríamos a menor noção de quanto os valores medidos estariam fora do alvo de medidas, a fim de identificarmos os erros sistemáticos. No Quadro 11, apresentamos uma classificação da diferença entre erros aleatórios e sistemáticos.

Quadro 11 - Classificação de erros aleatórios e sistemáticos

Classificação de Erros	
Erros Aleatórios	<ul style="list-style-type: none"> - Maior parte de natureza indeterminada. - Dispersão simétrica. - Podem ser detectados pela repetição da experiência. - Minimizados (nunca anulados) por meio da análise estatística. - Origem subjetiva. - Afetam a precisão dos dados.
Erros Sistemáticos	<ul style="list-style-type: none"> - Causa quase sempre determinada. - Dispersão tendenciosa. - Não se detectam pela repetição da experiência. - Não é possível efetuar sua análise estatística. - Podem ser eliminados (total ou parcialmente) introduzindo fatores corretivos. - Afetam a exatidão dos dados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Portanto, dependendo da metodologia aplicada ao processo de medida, aliado ao tipo de abordagem adotado no laboratório didático, podem ocorrer altos índices de erros de medidas e/ou ação e investigação, cometidos por alunos, que têm como consequências a dificuldade de entender conceitos e não serem capazes de dominar a investigação de fenômenos físicos.

Os erros de ação e investigação serão apresentados na forma de categoria de análise, no processo de investigação por meio da abordagem qualitativa. Tal

escolha se fez por julgarmos que esses erros são parâmetros de referência para aprendizagem do aluno, a fim de confirmação da hipótese de nossa investigação.

3.3 Modelagem Matemática no Ensino de Física

A modelagem matemática como estratégia de ensino de Física ainda está em fase de consolidação, devido aos poucos estudos e publicações a respeito desse assunto. Dessa forma, faremos um resumo do que julgamos ser os principais trabalhos envolvidos nessa área, a fim de apresentarmos nossa proposta para aplicação de modelagem matemática como estratégia de ensino de Física experimental.

No artigo de Ferruzi et al. (2004), a Modelagem Matemática, por meio da abordagem de Bassanezi (2009), é direcionada a obter o modelo por meio de atividades físicas (lei de Ohm e comportamento da temperatura do forno elétrico). São feitas apresentações parciais da fundamentação teórica e os alunos obtêm o modelo a partir de dados coletados do experimento.

No artigo de Souza; Espírito Santo (2008), a modelagem é proposta como metodologia de ensino e aprendizagem de Física no contexto da sala de aula, com abordagem de Bassanezi (2009). Trata-se, conforme os próprios autores afirmam, de uma proposta de caráter interdisciplinar e contextualizada, por meio de uma atividade que utiliza os conceitos de conservação da energia mecânica. Inicialmente, o modelo teórico é apresentado parcialmente, trabalhando conceitos físicos no decorrer da atividade com orientação do professor. Em seguida, com a obtenção do modelo para energia mecânica, pelos alunos, o professor questiona seu significado e complementa com argumentações necessárias.

No artigo de Barbosa (2009), o autor destaca a importância dos modelos no ensino de ciências ao argumentar que os modelos matemáticos são partes construtivas do discurso pedagógico das ciências, assim como, nas teorias e/ou modelos científicos.

À primeira vista, talvez o caso mais visível, para nós, seja o da física. Apesar da forte presença dos modelos matemáticos nas teorias desta disciplina, Greca e Santos (2005) sublinham que não se pode reduzir o modelo matemático à teoria, porque o primeiro somente possui sentido a luz do segundo. (BARBOSA, 2009, p. 71).

Barbosa (2009) faz três atividades de Modelagem Matemática (física, química e biologia), argumentando que os modelos jogam diferentes papéis na educação científica. No caso da física, trabalhou-se um experimento de sala de aula organizado para introduzir o princípio de inércia. O autor destaca a necessidade da apresentação do modelo teórico para legitimar o modelo matemático.

O próprio experimento acima descrito foi elaborado para manter um certo controle sobre o que os alunos poderiam falar. A própria tarefa é seqüenciada de modo que provavelmente os alunos concluam o esperado (ou planejado) pelo professor. Além do fato de os alunos reconhecerem que estão numa aula de Física, pode-se verificar alguns “cuidados” para conduzir os alunos para a conclusão esperada. Eles são requeridos a usarem procedimentos matemáticos legitimados e conhecimentos físicos já anteriormente estudados (como a conclusão de que a aceleração no experimento é zero). Também as partes da tarefa – introdução do professor, coleta de dados, representação matemática, interpretação, conclusão – estão organizadas para legitimar uma certa conclusão. Assim, o próprio experimento já foi estruturado com base no discurso pedagógico da Física, de modo a garantir a aderência dos alunos a um certo discurso (BARBOSA, 2009, p. 71).

No artigo de Morrone et al. (2007), foi analisada uma atividade que teve como objetivo abordar alguns tópicos que compõem o conteúdo programático de eletrodinâmica. Foi uma atividade direcionada a obter o modelo físico a partir de observações, medidas e indução do docente, considerando que os alunos já possuíam conceitos estabelecidos anteriormente no estudo da eletrostática.

No artigo de Campos e Araújo (2009), foram analisadas duas atividades de cinemática, a primeira utilizando o enfoque de laboratório programado e a segunda com enfoque epistemológico. As abordagens utilizadas foram as etapas 1 e 3 da proposta de Barbosa (2001) para a Modelagem Matemática. No primeiro experimento, foi apresentado um roteiro detalhado com o funcionamento dos instrumentos de medidas, assim como o modelo teórico; no segundo, o roteiro fornecia informações do objetivo do experimento sobre o movimento dos objetos num plano inclinado liso e com atrito. No primeiro caso, o autor destaca o sucesso das medidas, análise dos dados e discussão dos resultados, enquanto que no segundo, os alunos não conseguiram avançar na representação dos modelos matemáticos.

Do exposto acima, percebemos que em alguns artigos a fundamentação teórica é apresentada de forma atuante e direcionada, em outros, de forma investigativa; o aluno procura a conceituação a partir dos dados obtidos de forma

empírica. A Modelagem Matemática como estratégia de ensino de Física torna-se uma atividade experimental, mesmo dentro da sala de aula tradicional.

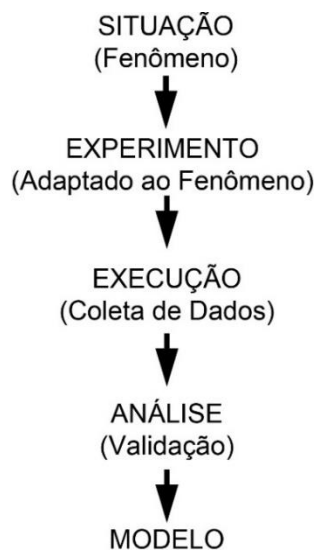
A Modelagem Matemática tem grande poder de matematizar o fenômeno enquanto que a interação do professor com o aluno, por um processo de induzir o pensamento, tem como consequência a aprendizagem da fundamentação teórica dos fenômenos físicos.

3.4 Modelagem Matemática como Estratégia de Ensino na Física Experimental

A proposta de modelagem matemática adotada para esse trabalho de pesquisa, conforme especificado na Seção 3.1, utiliza a concepção de Bassanezi (2009), Chaves e Espírito Santo (2011), pelo fato de suas ações possibilitarem uma associação com as ações de experimentação, conforme apresentado na Seção 2.4.

Para a experimentação, optamos pela independência dos modelos teóricos, isto é, não adotamos uma apresentação formal das teorias e leis físicas a serem confirmadas por meio dos experimentos, como usualmente é feito nas disciplinas experimentais que são ministradas nos laboratórios didáticos de física. Nesse caso, eliminamos os roteiros pré-definidos das execuções, devido seu objetivo inicial (antes da execução do experimento) ser de apresentar ao aluno o modelo teórico, obrigando-o a uma comprovação, diferentemente da estratégia da Modelagem Matemática para o ensino, cujo direcionamento ao aluno é o de obter o modelo teórico como objetivo final. Sendo assim, adotamos níveis de estruturação de ensino, de modo que, diminuam as intervenções do docente para que ocorra uma evolução da autonomia do aluno. De todo, uma abordagem parcial do laboratório não estruturado com enfoque na estrutura do experimento e epistemológico, nos parece mais adequado ao nosso propósito de aplicação com a Modelagem Matemática.

Basicamente as ações da experimentação no laboratório didático são:

Figura 13 - Ações para o laboratório didático

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

No caso da modelagem matemática, baseado nas abordagens de Bassanezi (2009), Chaves e Espírito Santo (2011), as ações se encadeiam da seguinte forma:

Figura 14 - Ações da modelagem matemática pela abordagem Chaves; Espírito Santo (2011)

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Portanto, tanto no enfoque do laboratório didático (figura 13) quanto na abordagem da Modelagem Matemática (figura 14), é possível uma aglutinação das ações devido ambas terem caráter experimental de desenvolver no aluno, conforme define Barbosa (2001), uma aprendizagem na qual são convidados a indagar e/ou

investigar, por meio da matemática, situações oriundas das outras áreas do conhecimento, assim como as ações do laboratório didático, com ênfase na estrutura do experimento, em que os procedimentos não são detalhados e o auxílio aos alunos ocorra apenas na estrutura da experiência (CAMPOS; ARAÚJO, 2011).

Dessa forma, definiremos a associação da abordagem da Modelagem Matemática mais a do laboratório didático, não estruturado com enfoque no experimento e epistemológico, como *estratégia de ensino da Física experimental por meio da Modelagem Matemática*, constituindo-se das seguintes etapas: situação ou fenômeno, execução do experimento, obtenção de dados, análise, obtenção do modelo matemático e obtenção do modelo físico (Figura 13).

1) *Situação ou Fenômeno* - alguns autores, tanto na investigação do ensino de Física experimental, quanto de Modelagem Matemática, apresentam o problema de investigação a partir de uma situação real. Apenas optamos por não usar a palavra problema, pelo fato de alguns alunos a associarem a uma necessária solução, pela obrigatoriedade de existir um problema. O fenômeno a ser estudado num laboratório didático de física está vinculado aos tópicos das disciplinas experimentais; são fenômenos que estão associados a modelos, conforme define Bassanezzi (2009) e por nós adotados, de natureza educacional, linear, dinâmico, e determinístico. A importância da obtenção do modelo não está na descrição precisa da realidade dos fatos envolvidos e sim nos conhecimentos e procedimentos de medidas que constroem o modelo. A imprecisão da medida é considerada como um erro de natureza desconhecida, de modo que qualquer modelo descreve parcialmente o fenômeno estudado. Essa etapa é atribuída ao professor, que por sua vez, se baseia no conteúdo da disciplina, ou seja, ocorre um grau alto de intervenção do docente.

2) *Execução do Experimento* - definido o fenômeno, então é outorgado um experimento que o reproduz e gera, na maioria das vezes, dados numéricos. A montagem e execução do experimento é tarefa exclusiva do aluno, com pequenas intervenções do docente (atos corretivos), de modo a evitar grandes desvios de resultados.

3) *Obtenção de Dados* - executado o experimento, os dados numéricos são obtidos. Cabe afirmar que nos experimentos usados em nossa investigação, esses dados são de natureza quantitativa. Essa também é uma etapa destinada ao aluno, com monitoramento do docente.

4) *Análise* - destinada a dar um significado à medida obtida, a análise dos dados numéricos é a conformidade da situação retratada pelo fenômeno com a lógica da matemática. Nessa etapa, é comum aparecerem erros de medidas e erros de ações, devido à própria imprecisão dos dados (alguns aceitáveis, outros não) e a má condução do experimento, por parte do aluno que o executa. Nesse caso, é necessária uma intervenção do docente, seja para confirmar os dados ou refutá-los a ponto do experimento ser novamente executado para obtenção de novos dados.

5) *Obtenção do Modelo Matemático* - validados os dados, é então obtido um modelo matemático, podendo ser qualificado como modelo parcial, pelo fato de justificar apenas a tendência da medida, sem qualquer justificativa relativa ao significado da grandeza física. Podem ser feitos ajustes de curva, estudo do comportamento variável ou constante dos números, a fim de se obter um modelo puramente matemático. Nessa etapa, o aluno pode obter este resultado apenas com seus conhecimentos prévios, dependendo do nível do cálculo matemático envolvido no fenômeno.

6) *Obtenção do Modelo Físico ou Confronto com o Modelo Teórico* - nesta etapa, ocorre a análise da coerência entre o modelo matemático e o modelo físico. Trata-se de uma ação que requer uma intervenção indutiva por parte do docente, devido à dificuldade do aluno em justificar seus dados, ou seu modelo matemático, e as grandezas física que estão relacionadas a uma teoria ou lei científica. Trata-se de uma ação aberta à própria atitude do professor de saber induzir sem propriamente impor ao aluno um modelo teórico.

Portanto, essas seis etapas da Modelagem Matemática justificam tornar o laboratório didático não estruturado quando as atitudes dos alunos não dependem

dos manuais pré-definidos; considera-se este um ambiente de ensino gerador de aprendizagem de conceitos físicos de uma forma que difere do modelo tradicionalmente adotado.

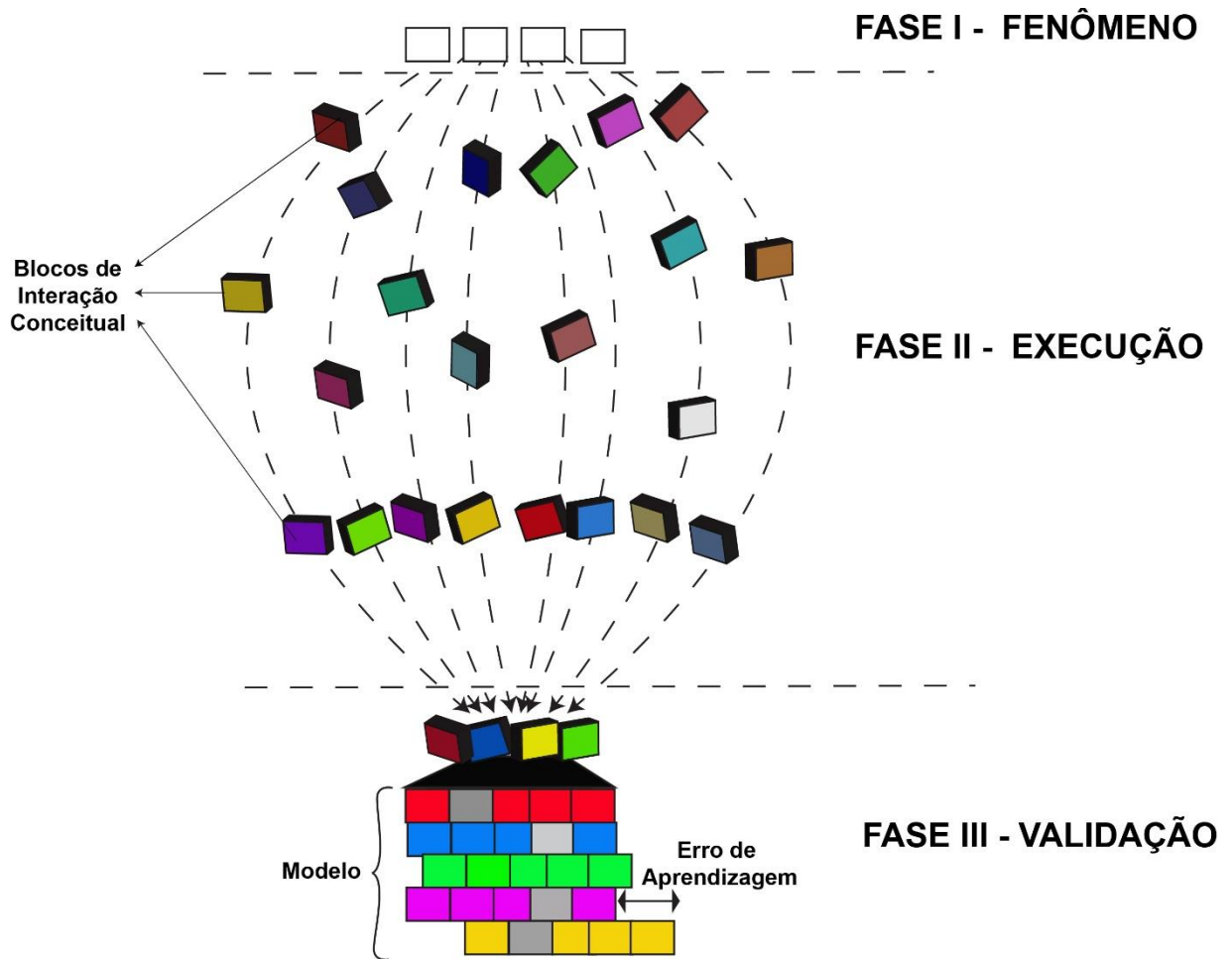
O processo de Modelagem Matemática por nós adotado é uma estratégia de ensino de conceitos físicos no laboratório didático, com ênfase na estrutura do conhecimento destinado ao ensino superior. As etapas do processo, figura 15, resumidamente podem ser divididas em três fases: fenômeno, execução e validação.

O compromisso do aluno é obter um modelo composto por grandezas físicas que dê significado e justifique o fenômeno estudado; porém, durante o processo, vão se formando blocos de interação conceitual, que são pequenos conceitos físicos, que, como um todo, formam modelo teórico que se deseja aprender.

Evidentemente, ao se obter o modelo final, esses blocos não se encaixam perfeitamente, havendo um acúmulo de desvios, que fazem parte da imprecisão da aprendizagem (erros relativos ao não entendimento de conceitos) e que consideramos normal e que só diminuem ao longo do tempo com a repetição, ou não (por outra metodologia), do estudo destes conceitos.

De início, os blocos são dispersos, o que demonstra que o entendimento ainda está aberto, limitando-se a conhecimento rudimentar do fenômeno, de modo que, ao passar para fase de execução, os conceitos vão se formando e se adequando à situação; assim, lentamente o processo de entendimento vai se formando. Além disso, as grandezas físicas aparecem a partir das medidas, tornado os blocos de interações conceituais mais coesos de modo a formarem um bloco maior, retratado pelo modelo físico na fase final de validação.

Figura 15 - Etapas do processo de modelagem matemática no laboratório didático



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Esclarecemos que a descrição das etapas da figura 15 não trata de mostrar como ocorre o processo de aprendizagem - assunto que consideramos complexo e que foge do objetivo dessa investigação -, apenas procuramos apresentar uma maneira de entender a Modelagem Matemática numa forma cognitiva simples, quando atua como metodologia na opção do ensino de Física experimental.

Associando as etapas da Modelagem Matemática com a concepção de ensino pela experimentação vista na Seção 2.4, obtemos uma proposta de estratégia de ensino que sustenta a hipótese deste trabalho.

Para um melhor entendimento da fundamentação teórica adotada com a proposta de investigação, apresentamos três etapas de articulação: aluno, conteúdo e laboratório.

1) *Articulação para o aluno*: o tipo de procedimento adotado considerará o aluno como cientista normal e de uma revolução (Quadro 2). As duas etapas se encaixam dentro da Modelagem Matemática. Na ciência normal, o aluno segue conteúdos disponíveis das disciplinas experimentais do currículo dos cursos em questão, enquanto que, na revolução em sala, do qual fazem parte a elevação do nível conceitual e introdução às anomalias, o aluno é apresentado ao fenômeno a ser estudado, como um problema de investigação, de modo que seus conceitos do cotidiano chocam-se com o de investigação.

2) *Articulação para o conteúdo*: visa adotar o conteúdo das disciplinas e suas características, como apresentado por Arruda; Silva e Laburú (2001, p.105), na Seção 2.2, em que o direcionamento dos fatos é para a construção do paradigma. A escolha do tema num curso de graduação é direcionada para as peculiaridades da proposta pedagógica. Num curso como engenharia, por exemplo, nosso problema de investigação está inserido ao cálculo das constantes elásticas de determinadas molas, que, por sua vez, faz parte do conteúdo da disciplina experimental. Essa articulação é reforçada pela possibilidade 2 em Chaves; Espírito Santo (2011), para a Modelagem Matemática em que a escolha do tema é atribuída ao professor.

2) *Articulação para o laboratório*: o tipo de laboratório será classificado como divergente e de natureza não estruturado, com ênfase na estrutura do equipamento e enfoque epistemológico. O primeiro classifica-se dessa forma devido o aluno interagir com a estrutura do experimento, enquanto o segundo está associado à identificação da natureza do conhecimento a ser estudado. Em ambos os casos, os roteiros foram eliminados, por não estarem de acordo com as etapas da Modelagem e os tipos de instrumentos investigativos serão quantitativos com aparatos de montagem sofisticados.

Do exposto, justifica-se que para o uso da Modelagem Matemática, como estratégia de ensino no laboratório didático de Física, serão necessárias algumas considerações:

a) *Intervenções* - o processo de Modelagem tem como objetivo, embora não necessariamente, a obtenção de um modelo matemático que, posteriormente, com as devidas justificativas baseadas em leis e teorias, se constituirá num modelo que descreve o fenômeno com veracidade científica. Nesta transição do modelo matemático para a justificativa física, o aluno normalmente não a alcança por conta própria, como enfatiza Thomas Kuhn (2011b) no ensaio a respeito da experimentação em física. Esses são apenas números num processo de repartição, de modo que, para engajar um significado aos dados obtidos, é necessária a ação do professor diante do quadro de dificuldades apresentado pelo discente por ocasião da execução do experimento. A essa ação denominaremos *intervenção*.

Por exemplo, quando no experimento do pêndulo simples os alunos obtêm a relação do período medido, com o comprimento do fio, o resultado é uma constante numérica que atesta apenas a relação de proporcionalidade das duas grandezas. Eles não associam que a constante é a relação de duas quantidades numéricas com a aceleração da gravidade. Neste sentido, Gaspar (2014), em seu estudo sobre ensino experimental de Física, afirma que a colaboração do professor:

Não é essencial apenas para que o aluno aprenda o conteúdo teórico de Física, mas para que conheça o modo como se realiza a prática experimental dessa disciplina, o que pode dar a ele uma visão inicial do que se poderia chamar de método científico. É claro que, à medida que os alunos se familiarizam com essa prática, a colaboração do professor pode tornar-se mais limitada, a fim de proporcionar-lhes maior autonomia. Todavia, toda prática experimental, em qualquer fase do curso, requer alguma colaboração do professor (GASPAR, 2014, p. 214).

Evidentemente que o processo de intervenção varia conforme a natureza do fenômeno estudado e a complexidade do experimento. Há casos de poucas intervenções por parte do professor, mas há situações que exigem várias intervenções. Porém, quanto menos intervenções ocorrerem, mais liberdade de aprendizagem o aluno terá por meio de suas próprias ações.

Portanto, classificaremos três tipos de intervenção, baseados nas etapas de modelagem matemática, quando aplicadas nas aulas experimentais:

1) Intervenção Baixa - quando o professor faz pequenas observações, tais como, necessidade de ajuste do instrumento de medida, ajuste de cálculo

numérico. São intervenções que não comprometem o andamento do experimento.

2) Intervenção Média - quando o professor induz o pensamento ou procedimento do aluno, para que refaça sua ação no processo de medida. Pode comprometer o resultado do experimento, porém o aluno continua a frente das ações.

3) Intervenção Alta - o professor assume o procedimento no sentido de induzir o resultado, podendo, por exemplo, apresentar o modelo, caso o aluno tenha necessidade de obtê-lo ou manusear o experimento, com a observação do aluno, que não está mais a frente das ações.

a) Roteiros - Nas colocações de Kuhn, quando ele se refere a manuais, quer referir-se a textos direcionados a apresentar a fundamentação teórica e a funcionalidade dos instrumentos de medidas. Com a modelagem matemática é possível a eliminação desses textos, substituindo-os pela intervenção do professor para a explicação do funcionamento do experimento, fato esse necessário conforme a complexidade do aparelho de medida. Em relação à fundamentação teórica, não será necessária sua apresentação, visto que os roteiros a destacam como o objetivo a ser alcançado, o que contraria o uso da modelagem.

b) Modelo Teórico – o entendimento do modelo teórico é o objetivo a ser alcançado no ensino de fenômenos físicos. Nesta proposta metodológica, ele não pode anteceder aos fatos; portanto, consideramos que modelagem matemática tem sustentabilidade para alcançar a compreensão desses fenômenos por parte do aluno, que desenvolve a aprendizagem por meio de investigação, embora de uma maneira controlada, ou seja, com a ajuda indutiva do professor e não de maneira totalmente aberta à escolha do que se deseja aprender.

CAPÍTULO IV - ANÁLISE DE RESULTADOS POR EXPERIMENTO

Este capítulo é dedicado à apresentação da fase experimental do trabalho de pesquisa que compõe a tese aqui sustentada.

Esboçamos a proposta metodológica de investigação, aplicando a abordagem quanto ao tipo de laboratório didático de Física associado à Modelagem.

4.1 Método Hipotético - Dedutivo

Segundo Bunge (1989), o método é definido como ações que investigam e busca a solução de um problema. Essas ações variam a partir da natureza do problema, ou seja, conforme a peculiaridade das áreas científicas. Porém, num raciocínio mais abrangente, essas ações, fazem parte de uma metodologia geral compartilhada por todas as áreas científicas e que se propõem a cumprir as seguintes etapas, conforme resume Szczepanik (2011):

- 1) Descobrimto do problema.
- 2) Colocação precisa do problema.
- 3) Procura de conhecimento ou instrumentos relevantes ao problema.
- 4) Tentativa de solução do problema com auxílio dos meios identificáveis. Se a tentativa resultar inútil, passa-se para a etapa seguinte; em caso contrário, à subsequente.
- 5) Novas ideias (hipóteses, teorias ou técnicas) ou produção de novos dados empíricos que possibilitem resolver o problema.
- 6) Obtenção de uma solução (exata ou aproximada) do problema com auxílio do instrumental conceitual ou empírico disponível.
- 7) Investigação das consequências da solução obtida.
- 8) Prova (comprovação) da solução: confronto da solução com a totalidade das teorias e da informação empírica pertinente. Se o resultado é satisfatório a pesquisa é dada por concluída até novo aviso. Do contrário, passa-se para a fase seguinte.
- 9) Correção das hipóteses, teorias, procedimentos ou dados empregados na obtenção da solução incorreta.

Nota-se que a partir do item 4, estão embutidos o que Bunge (1989) define como técnicas ou métodos especiais, conforme o tipo de área científica a ser estudada, considerando que a ciência é subdividida em diferentes áreas; o autor argumenta ainda que:

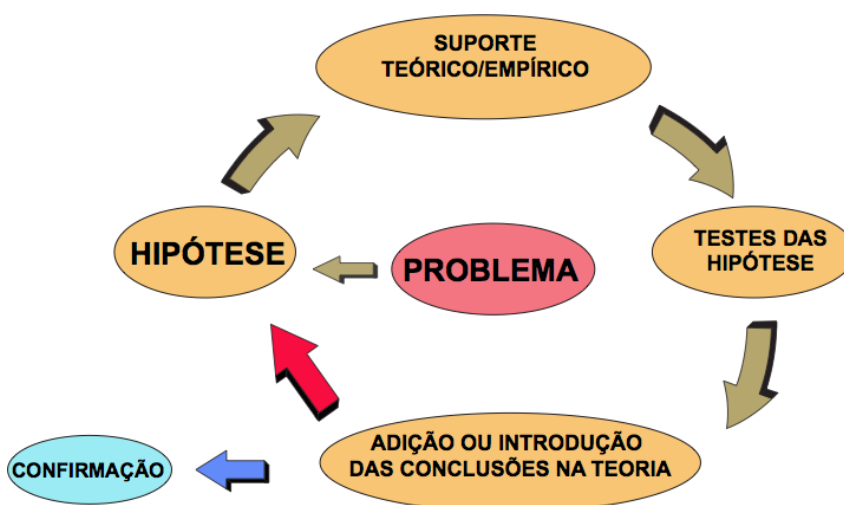
O método científico é a estratégia da investigação científica: afeta o ciclo completo de investigação e é independente do tema de estudo. Mas, por outro lado, a execução concreta de cada uma dessas operações estratégicas dependerá do tema em estudo e do estado de nosso conhecimento a respeito do dito tema (BUNGE, 1989, p.31).

Bunge (1989) admite que nem toda investigação científica está sujeita a regras bem definidas e que a criatividade do cientista pode fazer com que o método não seja algo necessariamente formal a ser seguido:

[...] a metodologia científica é capaz de dar indicações e fornecer meios para evitar erros, mas não pode suplantiar a criação original, nem sequer nos poupar de todos os erros (BUNGE, 1989, p.27).

Em nossa proposta de investigação, optamos pelo método hipotético-dedutivo, segundo Bunge e apresentado por Lakatos; Marconi (2011), baseado nas etapas anteriores da metodologia geral, conforme esquema da figura 16.

Figura 16 - Método hipotético-dedutivo esquematizado por Lakatos;Marconi (2011), baseado em Bunge (1989)



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.1.1 Aplicação do Método

Problema: inicialmente, nosso problema se apresenta a partir das dificuldades que os alunos encontram para entenderem conceitos (leis e teorias) de fenômenos físicos, nas aulas experimentais. Estas dificuldades mostram-se pela metodologia atual de apresentar o modelo por meio de roteiros ou manuais. Como consequência, ocorre a incidência de erros nos experimentos. Esses erros são relativos ao processo de medida (sistemáticos e aleatórios) e cognição (interpretação pelo sujeito).

Hipótese: a hipótese que sustentamos é de que a aprendizagem de conceitos físicos é facilitada a partir da aplicação da Modelagem Matemática na condição de considerar o aluno como cientista normal numa aula de experimentação.

Suporte Teórico: optamos pela abordagem de Zylbersztajn (1991) e Arruda; Silva; Laburu (2001), da ciência normal em sala de aula, em conjunto com a modelagem matemática como estratégia de ensino da Física experimental, por meio das abordagens de Bassanezi (2009) e Chaves; Espírito Santo (2011).

Testes da Hipótese: foi planejada a aplicação da hipótese em quatro experimentos, que fazem parte do conteúdo das disciplinas de Física experimental, para que fosse realizada a coleta de dados.

A coleta do material para investigação foi efetuada por meio da pesquisa de levantamento, entrevistas, observações e questionários com os sujeitos nas disciplinas experimentais de Física para os cursos de Engenharia e Licenciatura em Ciências.

De início, é realizado um levantamento de dados bibliográficos (livros e artigos) referente ao assunto de tratado na pesquisa. Em seguida, foram realizadas entrevistas por meio da captação de áudio (gravador digital) e posteriormente transcritas.

Completando o quadro da coleta de dados, foram feitas observações e questionários, com perguntas abertas, durante as aulas. Nas observações, por ser um ato que deve ser bem direcionado e seletivo, optamos por concentrar nas atitudes pessoais dos alunos, como por exemplo, no manuseio dos instrumentos e medidas, devido serem etapas em que mais ocorrem os erros de ação. Os questionários foram repassados antes e depois do experimento, por uma questão de estratégia, para avaliar o rendimento diante da Modelagem Matemática.

Introdução das Conclusões na Teoria: a análise sempre está presente em todos os estágios da investigação, porém assume um caráter mais formal quando os resultados, por meio da coleta de dados, encerram-se e o estudo se aprofunda em torno da temática do trabalho. Nesse estágio, a análise aconteceu em duas etapas: a primeira referente à organização do material bruto - relato de observações, transcrições de entrevistas, interpretações de questionários e outros tipos de materiais; na segunda, investigação analítica das características a serem estudadas, ou seja, busca de padrões de coerência dos dados coletados, comparando com as categorias de análise, para que se tenha uma referência a ser possível a validação da hipótese.

Em nossa investigação, faremos análise qualitativa e quantitativa, em cada experimento, por meio das grandezas físicas envolvidas, ações, opiniões e atitudes dos alunos para entenderem o significado do fenômeno estudado, de modo a evidenciar os principais aspectos do uso de modelagem matemática como estratégia de ensino da Física experimental.

Portanto, o uso do método hipotético-dedutivo está apropriado para a natureza de nossa investigação, visto que ações que envolvem o processo da modelagem matemática, aplicada à disciplina de experimentação em física, são semelhantes, pois também possuem características de investigação científica, embora com objetivos diferentes.

4.2 Tipos de Abordagem

Optamos por uma abordagem combinada entre a pesquisa quantitativa e qualitativa, devido às vantagens que as mesmas apresentam de se completarem em relação às limitações e pontos fracos, conforme Flick (2008) destaca:

- a) A pesquisa qualitativa pode apoiar a pesquisa quantitativa e vice-versa;
- b) A integração pode proporcionar um quadro mais geral da questão em estudo;
- c) A perspectiva dos pesquisadores direciona as abordagens quantitativas, enquanto a pesquisa qualitativa enfatiza o ponto de vista dos participantes;
- d) O uso de pesquisa qualitativa ou da pesquisa quantitativa pode ser apropriado em diferentes estágios do processo de pesquisa.

Portanto, essas características da abordagem escolhida estão de acordo com a metodologia que será utilizada nesse trabalho de investigação do processo de ensino de aulas experimentais de física.

4.3 Local

Salas do *Laboratório de Física Ensino* que pertence à Faculdade de Física (FACFIS) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Belém.

4.4 Sujeito

Para a avaliação mais aprofundada possível, optamos por dois tipos de sujeitos a serem investigados, mantendo o anonimato de suas investigações. O primeiro tipo são alunos que já tenham um conhecimento pré-concebido de física, no nível superior, ou seja, alunos dos cursos de graduação em Engenharia Civil que cursam o primeiro ano, e consta em seus currículos as disciplinas Laboratório Básico I e Física Básica I, sendo que esta última já tinha sido realizada anteriormente. O segundo tipo são alunos com conhecimentos de Física no nível de ensino básico do curso Licenciatura em Ciências Naturais do Instituto de Ciências Exatas e Naturais (IEMCI), da UFPA, Campus Belém. Os primeiros estudos, anteriores a essa monografia, foram realizados com uma turma de Engenharia Civil e resultou no artigo de Silva Neto; Espírito Santo; Braga (2013).

4.5 Categorias de Análise

A categoria de análise é uma referência para examinar resultados por meio da comparação com determinadas características dos sujeitos investigados. Trata-se de parâmetros abertos, ou seja, são escolhidos de acordo com as particularidades obtidas a partir do material recolhido por meio da observação, entrevistas e questionários, podendo tais categorias variar conforme a própria interpretação do investigador.

Em nossa investigação, optamos pela utilização de algumas categorias de análise propostas por Marinelli (2007). No estudo sobre as dificuldades enfrentadas

por alunos num laboratório didático de física, foram acrescentadas outras categorias que foram observadas a partir do material coletado.

Portanto, dessas informações determinamos as seguintes categorias:

a) Modelo Teórico Atuante

Categoria em que o aluno já possui um entendimento relativo ao modelo teórico estudado em disciplinas ministradas anteriormente. Embora seja difícil de mensurar o grau de aprendizagem que o aluno possui, admitiremos que ele tenha o suficiente para associar o modelo teórico ao experimento.

b) Raciocínio pelos Dados Experimentais

O aluno apresenta respostas ao comportamento das grandezas físicas, baseado nas operações matemáticas ou por análise gráfica, obtidas dos dados coletados do próprio experimento.

c) Raciocínio por Simetria

Categoria em que o aluno raciocina por simetria, seja na configuração geométrica do experimento ou no raciocínio analítico do cálculo matemático. Porém, ocorre a tendência de considerar semelhança em cada parte das medidas, buscando a média nos resultados. Por exemplo, quando o aluno escolhe um valor dentro do intervalo de incerteza de uma medida, existe uma forte tendência que ele calcule a média aritmética a partir dos valores extremos, quando ele poderia escolher qualquer valor que seria tão verdadeiro quanto a média.

d) Erros de Ação

A categoria erros de ação ocorre quando o operador comete falhas que comprometem o resultado. Entre as mais predominantes, destacam-se: inabilidade na montagem; considerações inadequadas para medida da grandeza; falta de conhecimento amplo de adequar o modelo teórico ao experimento.

Em alguns experimentos, é comum o operador ter dúvidas de montagem, como por exemplo, quando na montagem da experimentação com pêndulo simples, o aluno excede o comprimento do fio que prende a massa ao suporte, de modo que a massa toca na superfície da bancada ou como no experimento massa-mola em que o operador monta as molas invertidas em relação ao suporte.

Outra atitude que provoca erro de ação é a falta de conhecimento para associar o modelo teórico com o experimento; por exemplo, quando o estudo proposto é de oscilação, o aluno não associa com o movimento periódico do pêndulo simples, assim como, acha que a massa tem mais importância em ser medida do que o período. Os dois casos são exemplos de falhas que ocorrem no início do experimento, cometidas exclusivamente pelo operador.

Os erros de ação podem ser incluídos dentro do conceito de erro sistemático, por ocasionar desvio de amplitude na medida; porém, a fim de facilitar a análise e delimitarmos os erros sistemáticos à fase de execução, optamos por classificar e limitar os erros de ação à etapa de montagem do experimento. Este fato foi comumente detectado durante a investigação, o que justifica classificá-lo como categoria de análise.

e) Erros de Investigação

Nessa categoria, os erros de investigação envolvem a etapa de análise dos resultados obtidos pela execução do experimento. Trata-se de erros cometidos pelo operador quando atribui um significado à medida da grandeza. São erros de natureza cognitiva, por estarem associados ao sujeito, fazendo com que sua justificativa, em alguns casos, seja de difícil compreensão, porém não influenciam no resultado das medidas e sim, na sua validação. Os erros de investigação mais comuns estão relacionados com:

- a) Dificuldades no entendimento da matemática com o experimento;
- b) Comprometimento excessivo com os resultados esperados;
- c) Confiança na lógica dos fatos gerados apenas pela observação.

O erro de investigação, por um ponto de vista da cognição, pode ser subdividido em subcategorias, porém preferimos uma abordagem única, sem divisões, por considerarmos a facilidade de análise e não necessitarmos, para isso, de uma abordagem mais aprofundada da psicologia cognitiva, o que desviaria esse trabalho de seus reais objetivos.

4.6 Experimento de Teoria de Erro

Essa atividade tem como objetivo fazer com que o aluno entenda a teoria de erros. Trata-se de uma teoria que apresenta o significado da medida coletada num experimento.

A teoria de erros é o formalismo matemático, particularmente estatístico, no qual os dados são submetidos devido sua imprecisão, causado por flutuações, para que se obtenha valores coesos da grandeza investigada.

É muito importante que nas atividades de um laboratório didático de física, essa seja a primeira experiência que o aluno tenha acesso, pelo fato que nos outros experimentos a teoria de erros se fará presente, chegando a influenciar nos resultados e análise dos dados.

Os sujeitos foram alunos do segundo semestre do curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará e o local, o Laboratório de Física Ensino da Faculdade de Física. A distribuição foi de cinco alunos por quatro bancadas, totalizando 20 alunos.

4.6.1 O Experimento

Trata-se de uma atividade experimental relativamente simples, para que o aluno se adapte com o ato da medida e, principalmente, entenda o valor da flutuação dos dados.

Para medidas de dimensões, foram disponibilizados aos alunos (por equipe) dois instrumento de precisão³: paquímetro e micrômetro, assim como alguns objetos usados na construção civil.

As bancadas foram distribuídas na forma retangular, permitindo assim o livre acesso do professor, para o devido acompanhamento.

4.6.2 Modelagem Matemática no Experimento

As etapas da modelagem matemática, como apresentadas na Seção 3.4, foram:

Apresentação do Fenômeno - nesse experimento não se trata especificamente de um fenômeno físico, por esse motivo, fizemos alguns

³ Os detalhes técnicos dos instrumentos utilizados nos experimentos estão no ANEXO B.

questionamentos com alunos, por meio de entrevistas, tais como: significado da medida; que resultados precisos poderiam esperar; a medida melhora com a precisão do equipamento? Em nenhum momento apresentamos roteiros direcionados e orientamos os alunos apenas a realizarem as medidas das dimensões do objeto.

Execução do experimento e Obtenção dos dados - nessa etapa, a intervenção do professor foi mínima, explicando aos alunos apenas o funcionamento dos instrumentos de medidas. Em seguida, os alunos manusearam os instrumentos, obtendo as medidas.

Análise dos dados - os dados obtidos foram analisados na parceria professor/aluno, para se entender a coerência da medida. Nessa etapa, não ocorreram diferenças, de modo a se repetir o processo de medida⁴.

Obtenção do Modelo Matemático - diferentemente dos próximos experimentos, nessa atividade não se obtém um modelo físico a partir dos dados. O objetivo é apresentar modelos estatísticos: alguns diretamente, a partir dos resultados coletados, como por exemplo, a média aritmética; outros indiretamente, como o conceito de intervalo de incerteza.

Obtidos os dados, os alunos foram desafiados a tratarem os resultados estatisticamente. De início, o professor questionou o seguinte: *“já que foram feitas tantas medidas e o resultado, na maioria, tiveram diferenças de casas decimais, como poderíamos ter um resultado único que representasse as várias medidas?”* Depois de um pequeno debate, com sugestões do tipo: *“poderíamos pegar um valor aleatório e considerar como valor padrão”*, outro, *“poderíamos considerar um valor do meio da tabela de dados”*, chegou-se ao consenso, quando foi sugerido, que a soma dos valores dividido pelo número de medidas seria coerente com a pergunta inicial. Nesse momento, os alunos entenderam que o conceito de média aritmética representa o valor padrão das medidas.

O próximo conceito obtido foi o de desvio absoluto, por meio da seguinte pergunta: como saber qual o valor que mais se aproximaria do valor padrão, calculado anteriormente? Alguns não entenderam a pergunta e afirmaram que *“seria o menor valor da tabela”* e poucos responderam, parcialmente, que *“poderia ser feita a diferença entre a média e cada medida e comparar qual o menor valor”*. A resposta

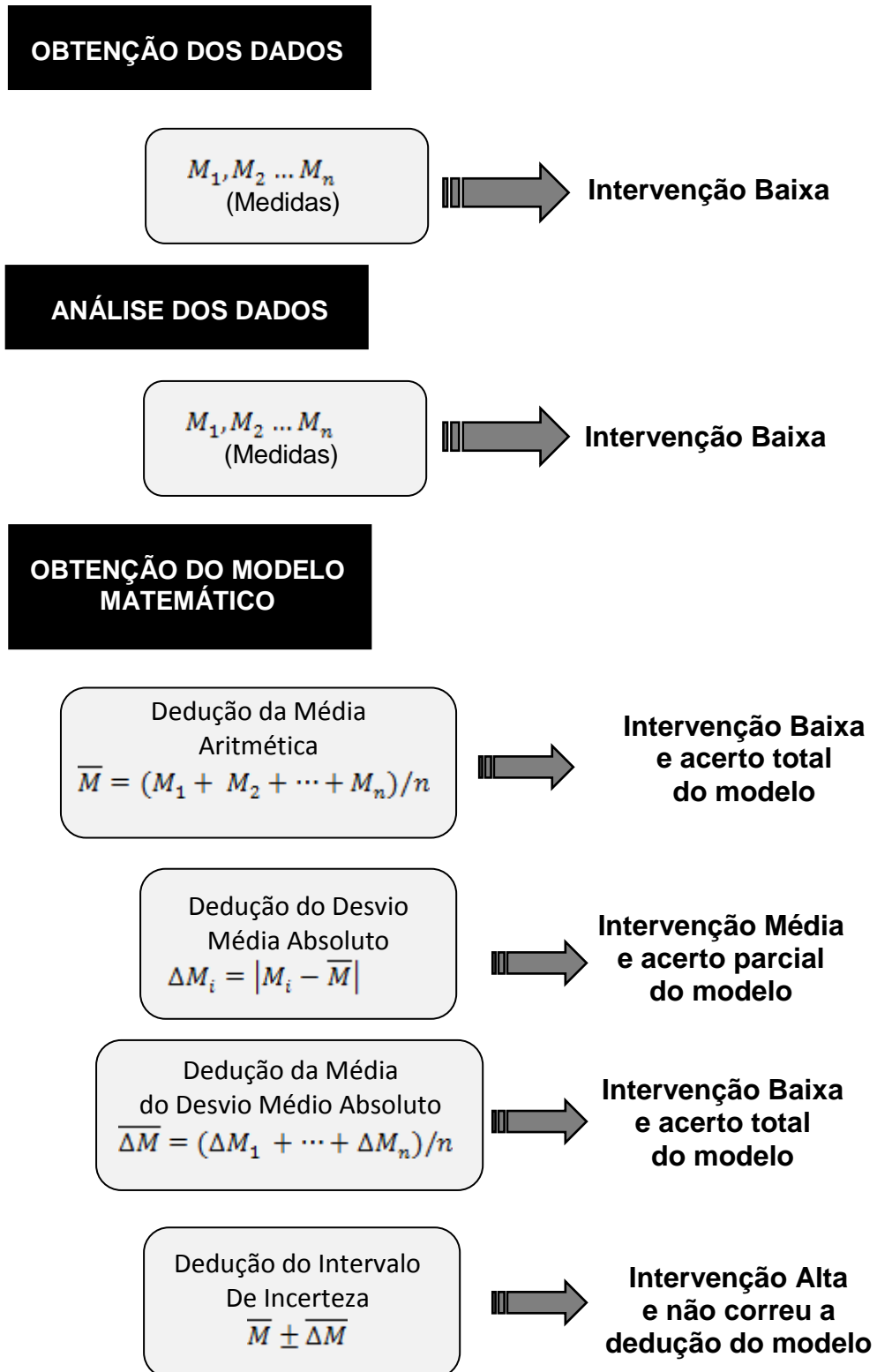
4 Os dados coletados na atividade, assim como seus resultados estatísticos, estão no APÊNDICE A.

ficou incompleta, devido o conceito de módulo matemático. Nesse caso, o professor mandou que os alunos calculassem o desvio; como apareceram resultados negativos, todos concluíram que era o valor mais próximo do padrão. Assim, ocorreu uma intervenção por parte do professor em explicar que o que se quer é o menor intervalo e não um valor, e que, para isso, será necessário tornar os resultados positivos. Nessa etapa, a maioria entendeu e concluiu que modelar a representação numérica seria positivo e tínhamos um modelo matemático para o desvio absoluto. Então, era necessário continuar com o cálculo da média do desvio, o que foi facilmente obtido pelos alunos ao questioná-los, semelhante ao que foi feito para a obtenção da média aritmética, o resultado é que a maioria obteve êxito e dividiu o desvio pelo número de medidas.

Porém, na última etapa - obter o intervalo de incerteza -, os resultados não foram satisfatórios. A pergunta inicial foi: *“como poderíamos obter um intervalo numérico que estivesse contido a maioria das medidas?”* Porém, não se obteve resposta do aluno, para que concluíssemos corretamente, pois a maioria não associou os resultados da média e desvio com o intervalo de incerteza. Nesse caso, ocorreu uma intervenção do professor para que o modelo fosse corretamente apresentado.

Avaliando a modelagem pelo grau de acerto e intervenções do professor, apresentamos na figura 17 a ocorrência de quatro intervenções baixas, uma média e uma alta, tendo como consequência os graus de acerto que são aceitáveis, já que proporcionaram ao aluno entendimento da estrutura do modelo matemático a partir dos dados coletados.

Figura 17 - Acertos e Intervenções na atividade de Teoria de Erros por meio da Modelagem Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.6.3 Categorias de Análise

Nesse experimento, identificamos as seguintes categorias que dão suporte para uma avaliação do método de ensino proposto.

Na categoria de *modelo* teórico *atuante*, os alunos já tinham noções do conceito de média aritmética, assim como, do cálculo geométrico (dimensão, área e volume), facilitando o entendimento do conceito de erros.

Na *categoria simetria*, quando solicitados a escolherem um valor fechado para as dimensões, para efeito de cálculo, os alunos preferiram obter a média aritmética a partir dos valores extremos do intervalo de incerteza, pois não entenderam que qualquer valor poderia ser válido; em outra observação, para corpos cilíndricos, optaram por medir o diâmetro na metade do corpo, quando poderiam escolher qualquer lugar da extensão do comprimento.

Na categoria de *erro de ação*, quando mediram utilizando o parafuso, utilizaram o paquímetro tocando nas fissuras do objeto, quando poderiam ter medidos pelas ranhuras, assim como, para a porca, preferiram os vértices, em vez dos lados. E nos *erros de investigação*, obtiveram uma conclusão insuficiente, quando solicitados a deduzirem o intervalo de incerteza.

4.7 Experimento de Momento de Inércia⁵

Esta atividade experimental objetiva a aprendizagem dos conceitos de momento de inércia quando ocorrem rotações dos corpos. É um fenômeno que tem pouco destaque nas atividades de laboratório, embora faça parte do conteúdo da disciplina.

Como o laboratório de ensino de Física não disponibilizava de equipamentos para a realização dessas medidas, optamos por construir e adquirir comercialmente os objetos e o experimento do plano inclinado.

Trata-se de um experimento importante na formação do engenheiro, pelo fato de existirem aplicações concretas de rotações em que é necessário um entendimento detalhado do conceito de momento de inércia de corpos bem definidos. Nos cursos de engenharia, esse assunto é tratado de uma maneira

⁵ Publicado no VII CNEMEM - SILVA NETO, M. J. S.; ESPÍRITO SANTO, A. O.; BRAGA, R. M.(2013).

teórica, com deduções matemáticas longas das teorias e fórmulas e pouca aplicação empírica.

Os sujeitos foram alunos do segundo semestre do curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará e o local, o Laboratório de Física Ensino da Faculdade de Física. A distribuição foi de cinco alunos por quatro bancadas e cada bancada forma um grupo (A, B,C, D e E), totalizando 20 alunos.

4.7.1 O Experimento

O experimento é composto de um plano inclinado e três objetos de rolagem: cilindro oco, maciço e esfera de aço maciça (fotografia 1).

Fotografia 1 - Plano inclinado (15, 109 e 11 cm) e cilindro de pvc oco, maciço (concreto) e esfera de aço maciça



Fonte: realizada pelo autor (2013).

Para medidas de dimensões, foram distribuídos aos alunos (por equipe) duas réguas milimetradas e para a medida do tempo, um cronômetro por equipe.

As bancadas foram distribuídas na forma retangular, permitindo assim o livre acesso do professor, para o devido acompanhamento.

4.7.2 Modelagem Matemática no Experimento

As etapas da modelagem matemática foram:

Apresentação do Fenômeno - nesta primeira etapa, os alunos foram questionados sobre o que provoca a rotação de um objeto que se movimenta num plano inclinado. Que grandezas físicas provocam esse movimento de rotação?

Execução do experimento e Obtenção dos dados - não foram apresentados roteiros direcionados e os alunos foram orientados a realizarem medidas do tempo de rolagem dos objetos e dimensões do plano inclinado. Nessa etapa, a intervenção do professor foi mínima, explicando aos alunos apenas o funcionamento dos instrumentos de medidas. Em seguida, os alunos obtiveram medidas para o tempo de rolagem dos objetos.

Fotografia 2 - Alunos executando o experimento momento de inércia



Fonte: realizada pelo autor (2013).

Análise dos dados - os dados obtidos foram analisados na parceria professor/aluno, para entender a coerência da medida. Nessa etapa, não ocorreram diferenças, de modo a se repetir o processo de medida.

Tabela 1 - Dados obtidos da medida do tempo referente ao deslocamento dos objetos no plano inclinado

Grupos	Tempo Esfera (seg)*	Tempo Cilindro Maciço (seg)*	Tempo Cilindro Oco (seg)*
Grupo A - GA	1,33	1,54	1,76
Grupo B - GB	1,37	1,56	1,77
Grupo C - GC	1,42	1,57	1,76
Grupo D - GD	1,33	1,56	1,76
Grupo E - GE	1,37	1,55	1,78

* Média aritmética para cinco medidas.

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2013).

Obtenção do Modelo Matemático - a dedução de um modelo matemático para o momento de inércia a partir dos dados medidos não é possível para alunos nesse estágio de aprendizagem, devido à complexidade do assunto em questão. Por isso, são necessárias considerações analíticas a partir de uma teoria devidamente formalizada.

Confronto com o Modelo Teórico - nesse estágio, a força da modelagem matemática reside em confrontar o modelo teórico com os dados obtidos e provocar a sua justificativa, tendo como consequência o entendimento por parte do aluno do fenômeno estudado. O professor apresentou o modelo teórico e arguiu com os dados medidos pelos alunos.

Após a etapa IV, foram feitos os seguintes questionamentos: os corpos chegam com a mesma velocidade? Foi respondido por unanimidade por todos que sim, porém as justificativas variaram com múltiplas respostas, com a maioria afirmando que se deve à variação da massa e do tempo, e uma parte afirmando que era devido às características proporcionadas pela presença da rotação. Era de se esperar esse tipo de resposta devido à influência das leis de Newton. Cabem aqui, algumas conjecturas, tais como: facilidade de conceituar a execução experimento pelas leis do movimento de translação e a deficiência na aprendizagem dos conceitos de rotação e momento de inércia.

Aluno 1 GC - “Não, porque o tempo foi diferente, pois os elementos percorreram a mesma distância em tempos diferentes, logo, a velocidade apresentada por cada elemento é diferente.”

Aluno 3 GE - “Não, devido suas massas serem diferentes, logo seus momentos de inércia são diferentes, dado que os seus raios de rotação são aproximadamente iguais.”

Dando continuidade, foram realizados mais dois questionamentos. O primeiro baseado na observação, no qual os alunos perceberam que os corpos rolam ao se deslocarem do ponto mais alto a base do plano, de modo que foi perguntado que caso não ocorressem rotações, os corpos chegariam (desprezando o atrito de fricção), na base do plano com as mesmas velocidades? Foram unânimes em afirmar que não, confundindo que a massa tem influência na velocidade, o que nos leva a conjecturar que os alunos ainda estavam com o modelo da rotação na cabeça, sem perceberem que se tratava de um movimento de translação, de modo que, a velocidade é a mesma para os três corpos. Observamos assim um fato de extrema dificuldade para o aluno, relativo ao seu cognitivo, que é a percepção de outro modelo com a alteração do fenômeno. Talvez seja explicada pela inibição provocada pelo medo de errar e/ou a necessidade da explicação por um modelo único, nesse caso, pela rotação.

Aluno 3 GA - "Não, a velocidade é influenciada pelo tempo, que é influenciado pela aceleração, que é influenciada pela massa".

Aluno 1 GD - "Não, pois os objetos têm pesos diferentes".

O levantamento de questionamentos nessa fase do processo funciona como intervenções para que os alunos possam decidir sobre quais procedimentos precisam adotar no experimento para respondê-los. Dando prosseguimento aos questionamentos, foi perguntado o que provoca a rotação. A maioria optou pela resposta que o atrito estático causa a rotação e uma pequena parte optou por não responder.

Gráficos 1, 2, 3 e 4 - Questionamentos do número de alunos que responderam com erros e acertos. Classificação das repostas como: AT - acerto total (plenamente justificável); AP - acerto parcial (resposta incompleta, porém aceitável); E - errado (resposta inaceitável).

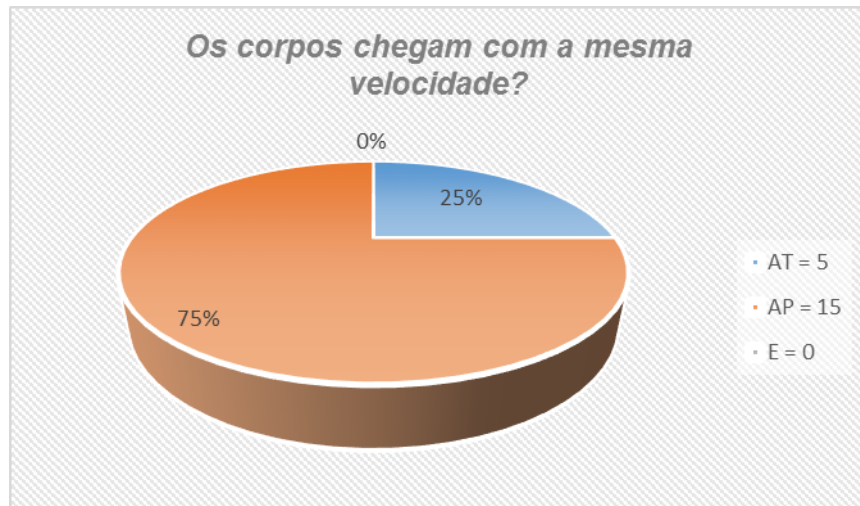


Gráfico 1

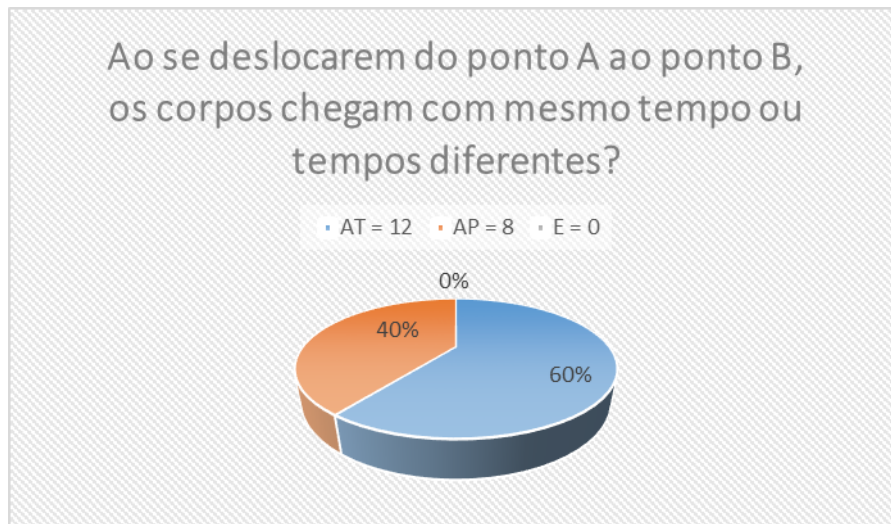


Gráfico 2

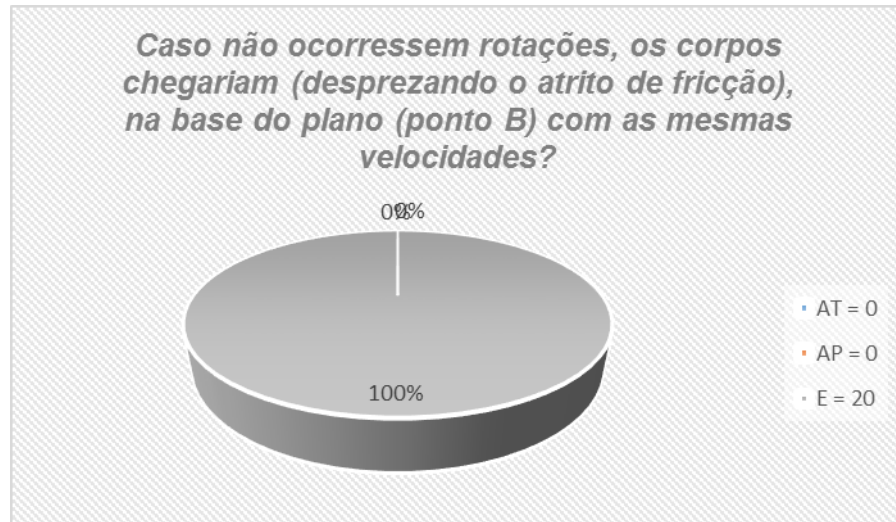


Gráfico 3

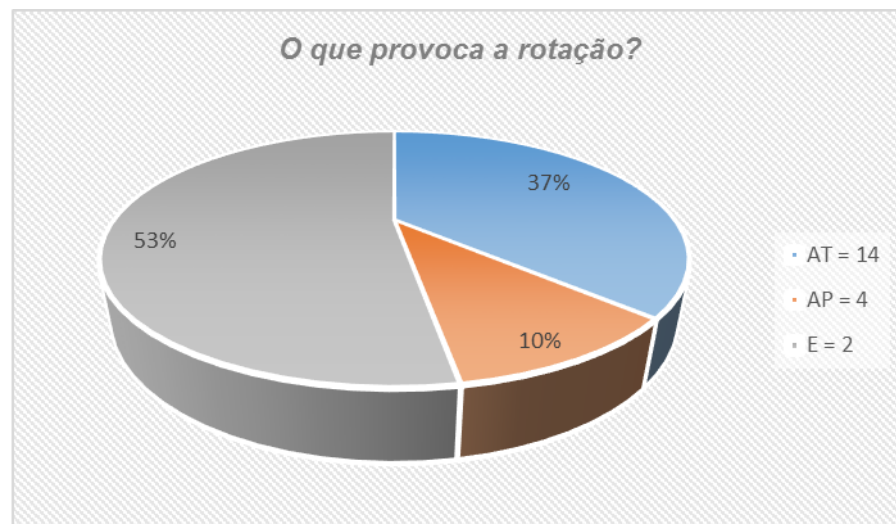


Gráfico 4

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados (2013).

Após a etapa V, foi explorado o modelo teórico, o conceito do movimento de rotação, assim como o de momento de inércia em sua definição matemática genérica e específica para cada corpo usado na atividade. A dedução matemática da velocidade e aceleração dos corpos foi destacada para que o aluno percebesse a independência dessas grandezas em relação à massa. A dedução formal ocorreu por meio do princípio da conservação da energia, aplicada nas extremidades do plano, de modo que se obtêm as seguintes equações para a velocidade e aceleração, respectivamente.

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+C}} \quad \text{e} \quad a = g \frac{\text{sen}\alpha}{1+C}$$

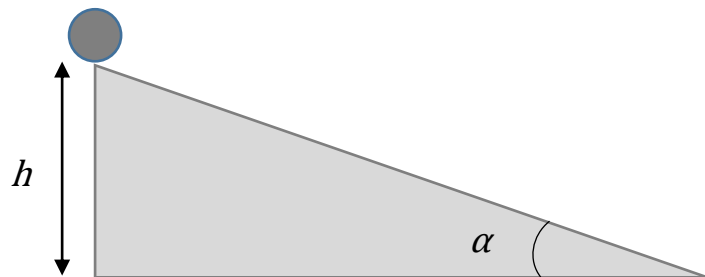
Enfatizamos neste trecho “que os modelos matemáticos apresentados são partes do conteúdo que se quer “transmitir” (BARBOSA, 2009, p. 80), para justificar o porquê das velocidades e acelerações serem diferentes, em que destacamos que para cada corpo a constante C varia conforme o tipo de geometria que os corpos apresentam, de modo que:

$$C_{\text{Esfera}} = 2/5 \quad C_{\text{Cilindro Maciço}} = 1/2 \quad C_{\text{Cilindro Oco}} = 1$$

Logo, observou-se certa compreensão dos alunos ao perceberem a causa das velocidades serem diferentes. Em seguida, iniciou-se a segunda parte da atividade, com os alunos tendo noção do modelo teórico, de modo a justificarem melhor a ocorrência do fenômeno da rotação.

Assim, os alunos mediram as grandezas h (altura do plano) e α (inclinação), conforme mostrado na Figura 19. Com isso, foi possível eles calcularem as velocidades e acelerações de cada corpo (Tabela 2).

Figura 18 - Esquema de execução do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Tabela 2 - Resultados das medições da altura e inclinação do plano inclinado e cálculo da velocidade e aceleração dos três corpos: Esfera (E), Cilindro Maciço (CM) e Cilindro Oco (CO).

	Altura h (m)	Inclinação α (graus)	Velocidade (m/s)			Aceleração (m/s ²)		
			E	CM	CO	E	CM	CO
GRUPO A	0,15	8	1,44	1,40	1,21	0,97	0,90	0,45
GRUPO B	0,15	7,6	1,44	1,40	1,21	0,92	0,86	0,64
GRUPO C	0,15	8	1,44	1,40	1,21	0,97	0,90	0,45
GRUPO D	0,15	8	1,44	1,40	1,21	0,97	0,90	0,45
GRUPO E	0,15	7,5	1,44	1,40	1,21	0,93	0,84	0,68

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

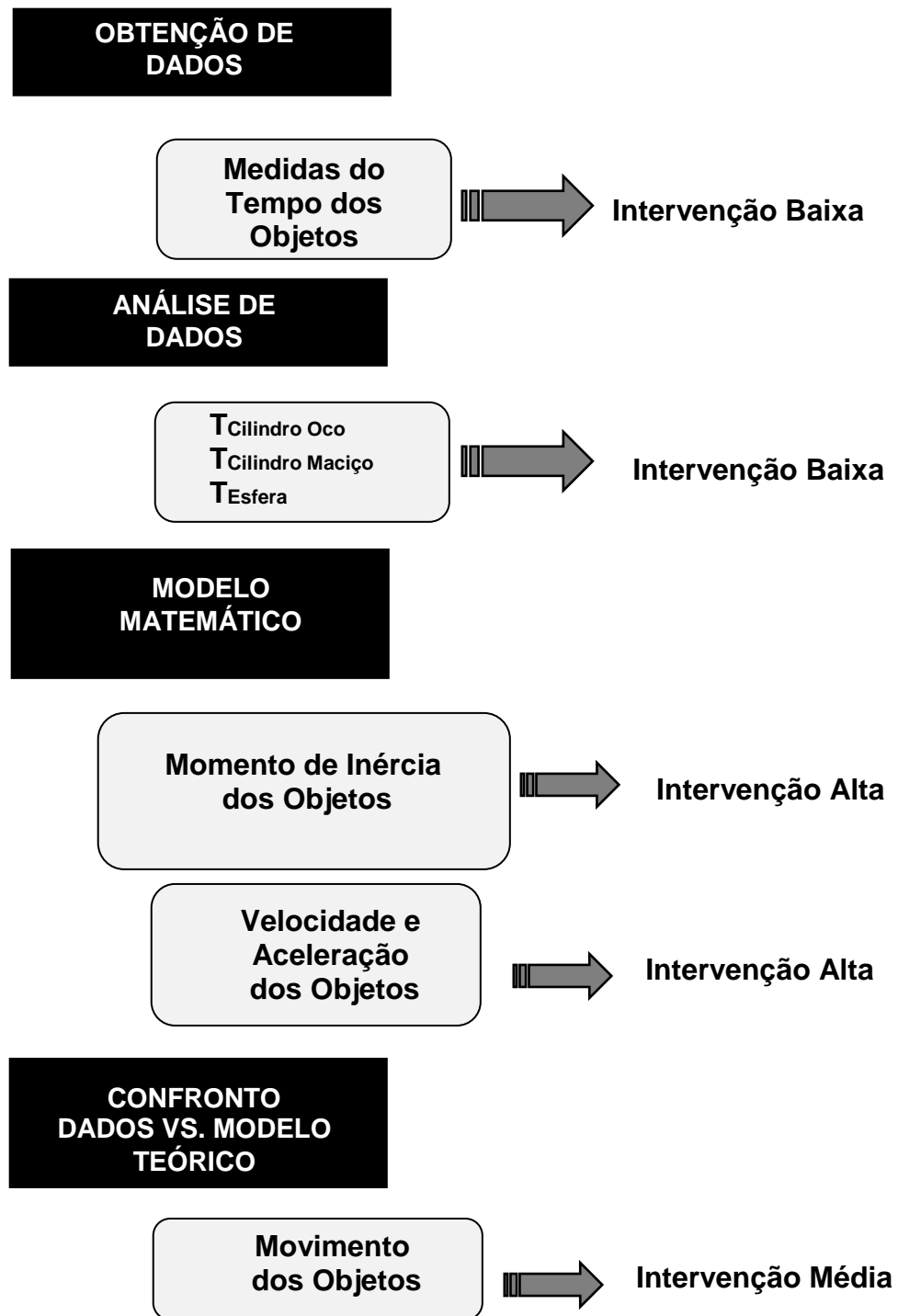
Com os dados obtidos pela Tabela 2, os alunos tiveram um claro entendimento da ordem de chegada dos corpos, por meio do real significado da constante C , associada à geometria do corpo, ou seja, ao realizarem o cálculo analítico da velocidade e aceleração, eles perceberam que a massa influencia de modo indireto, apenas como a mesma se distribui ao longo do corpo.

Essa aprendizagem ficou evidente quando foi feito o seguinte questionamento: o que aconteceria com a velocidade, se trocássemos o cilindro maciço por outro de diâmetro maior? A maioria (16 alunos) respondeu corretamente ao admitirem que a velocidade não depende da massa e sim da constante C , que permanece inalterada pelo fato de o cilindro não ter mudado suas características geométricas. E quatro alunos responderam que se alteraria, devido ao crescimento do diâmetro.

No quesito referente à intervenção do professor (figura 19), as duas primeiras etapas da atividade, obtenção e análise dos dados, atingiram intervenção baixa, sem a necessidade de o professor provocar mudanças nas atitudes dos alunos a respeito das medidas. No modelo matemático, no entanto, foi necessária uma intervenção alta, conforme especificado no item IV, referente às etapas da Modelagem aplicada no experimento.

As equações do momento de inércia, para cada corpo, foram apresentadas com a dependência da constante C , assim como da velocidade e aceleração. E, no último quesito, ocorreu uma intervenção média, considerando que os alunos adquiriram conhecimento dos modelos conceituais propostos e souberam associar com os dados medidos.

Figura 19 - Intervenções na atividade de momento de inércia por meio da Modelagem Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4.7.3 Categorias de Análise

Foram identificadas três categorias nas ações e raciocínio dos alunos. Poucas relativas ao modelo teórico atuante e outras pelos erros cometidos. No quadro 12, encontram-se as categorias associadas às ações dos alunos.

Quadro 12 - Categorias de análise

Descrição	Categoria
Modelo teórico atuante	Alguns alunos demonstraram ter conhecimentos fragmentados de rotação.
Erros de ação	<ul style="list-style-type: none"> - Localização dos objetos (esfera e cilindros) em relação à medida do tempo - Desfasagem do cronômetro em relação ao movimento. - Erros de paralaxe na localização do eixo da esfera.
Erros de Investigação	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretação errada dos erros de flutuação na medida do tempo. - Erros de paralaxe na localização do eixo da esfera. - Falsas interpretações para a constante C.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da coleta de dados (2015).

4.8 Experimento da Lei de Hook⁶

O experimento da lei de Hook é uma experiência aparentemente simples, porém de relevância, pelo fato de apresentar um modelo teórico envolvendo três grandezas físicas que se relacionam numa equação linear, a chamada *lei de Hook*.

Para um melhor aprofundamento da investigação, optamos por aplicar o experimento a duas turmas diferenciadas quanto ao pré-requisito das disciplinas de laboratório, no caso a Física ministrada com conteúdo de mecânica. A primeira turma foi do curso de Engenharia Civil (B), considerando o fato de os alunos já terem realizado a referida disciplina; a segunda turma, no entanto, foi de Licenciatura em Ciências Naturais (A), cujos alunos não possuem nenhum tipo de conhecimento em mecânica no ensino de nível superior (pelo fato de os mesmos terem realizado um processo seletivo, admitiremos que seus conhecimentos em Física restringem-se ao conteúdo do ensino médio).

⁶ Publicado no IX CNEMEM – SILVA NETO, M. J. S., FURTADO, A. B., ESPÍRITO SANTO, A. O., BRAGA, R. M. (2015).

Ambos os cursos pertencem à Universidade Federal do Pará e o local, o Laboratório de Física Ensino da Faculdade de Física. A distribuição foi de cinco alunos por quatro bancadas e cada bancada forma um grupo (1, 2, 3, e 4), totalizando 20 alunos.

4.8.1 O Experimento

O experimento é composto de uma mola, uma régua centímetro e um dinamômetro de escala 0 - 2N.

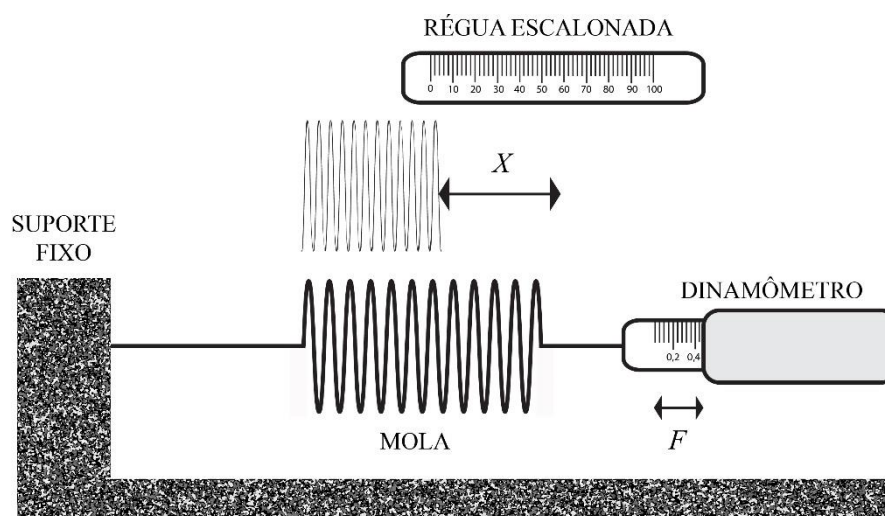
O material foi distribuído aos alunos (por equipe) e as bancadas posicionadas na forma retangular, para facilitar o acesso do professor e a interação entre os alunos.

4.8.2 Modelagem Matemática no Experimento

Apresentação do Fenômeno - é apresentado ao aluno o fenômeno elástico da distensão num corpo de prova, neste caso a mola. Em destaque, questionou-se a situação de uma mola, que ao se distender retorna para o seu estado inicial. Que grandezas físicas estão envolvidas para que essa situação ocorra?

Execução do experimento e Obtenção de Dados - sem os manuais de instrução, o professor atuou por meio de uma intervenção baixa. Os alunos montaram o experimento (figura 20).

Figura 20 - Experimento da Lei de Hook



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Em seguida, eles coletaram os dados. Nesta etapa, para as duas turmas, A e B, ocorreram pequenos erros, classificados pelas categorias de análise como *erros de ação*, que envolvem erros de paralaxe, montagem e calibração do instrumento de medidas.

Os dados obtidos foram da Força (F) medida pelo dinamômetro, quando a mola é estendida a um determinado comprimento (X), definido como a *distensão*.

Análise dos dados - foram coletados os dados pelas turmas A e B. Não ocorreu nenhuma discrepância nos valores obtidos. Destaca-se que os alunos da turma B estenderam um pouco mais suas medidas, embora seus intervalos para a medida da distensão estejam na faixa obtida pelos alunos da turma A (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3 - Resultados de algumas medições da Força (F) e Distensão (X), realizadas pelos alunos A.

MEDIDA	FORÇA F (N - Newtons)	Distensão X (cm - centímetros)
1	0,74	15,5
2	0,96	19,0
3	1,44	26,0
4	1,90	33,5
5	2,34	40,5

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

Tabela 4 - Resultados de algumas medições da Força (F) e Distensão (X), realizadas pelos alunos B.

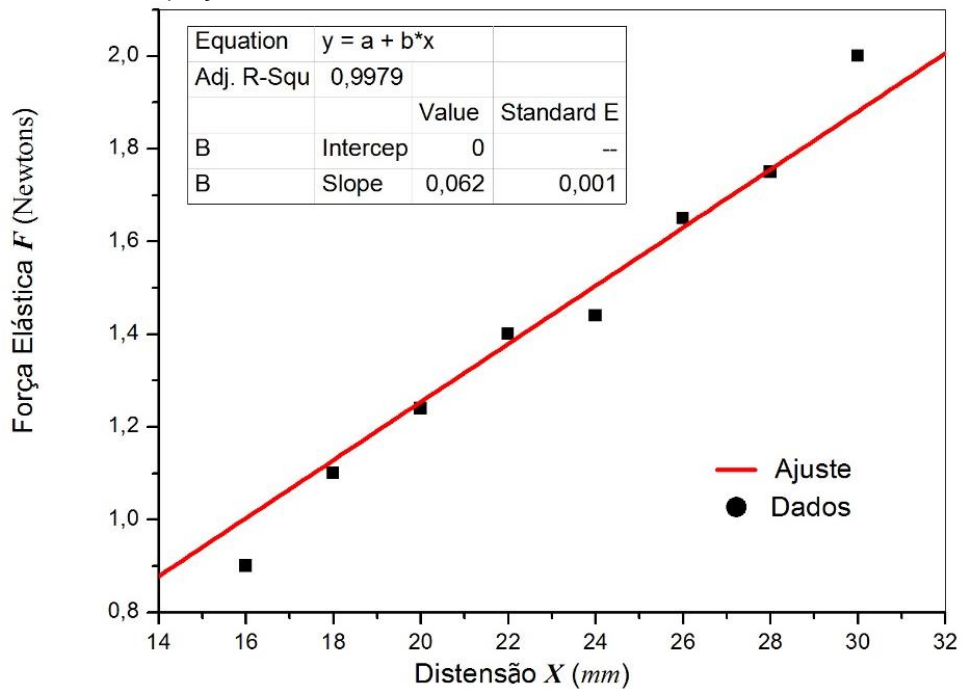
MEDIDA	FORÇA F (N - Newtons)	Distensão X (cm - centímetros)
1	0,90	14
2	1,20	16
3	1,24	18
4	1,40	20
5	1,44	22
6	1,48	24
7	1,66	26
8	2	28

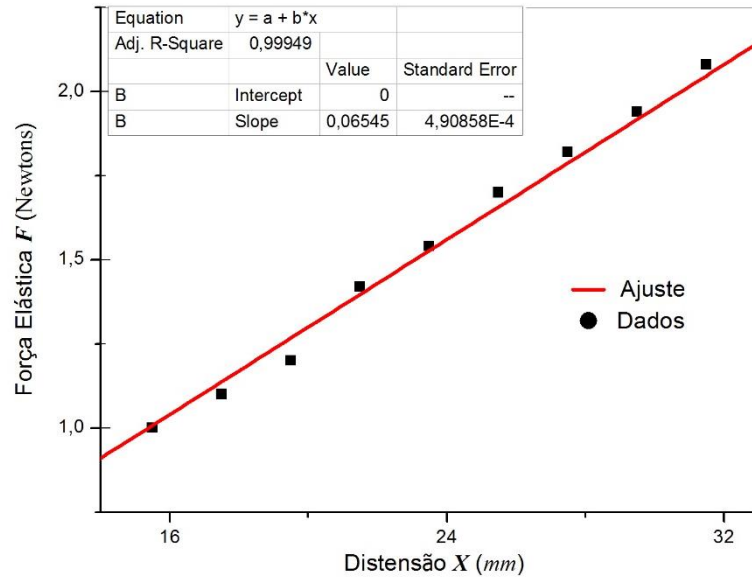
Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

Obtenção do Modelo Matemático – nessa etapa, o aluno foi orientado a obter um modelo a partir da análise dos dados quantitativos obtidos na etapa anterior e ocorreu que: para a turma B, a maioria apresentou um modelo matemático da proporcionalidade entre a força (F) e a distensão (X). Para a turma A, os resultados foram semelhantes; a turma concluiu que existe uma proporcionalidade da força pela distensão. Uma análise mais aprofundada desses resultados faz parte da análise qualitativa dos questionários que compõem a última seção deste experimento.

Confronto com o Modelo Teórico - Nessa etapa, o professor apresentou o modelo teórico da lei de Hook e solicitou aos alunos compararem o resultado teórico com o resultado obtido experimentalmente, por meio da análise dos respectivos gráficos (Gráficos 5 e 6).

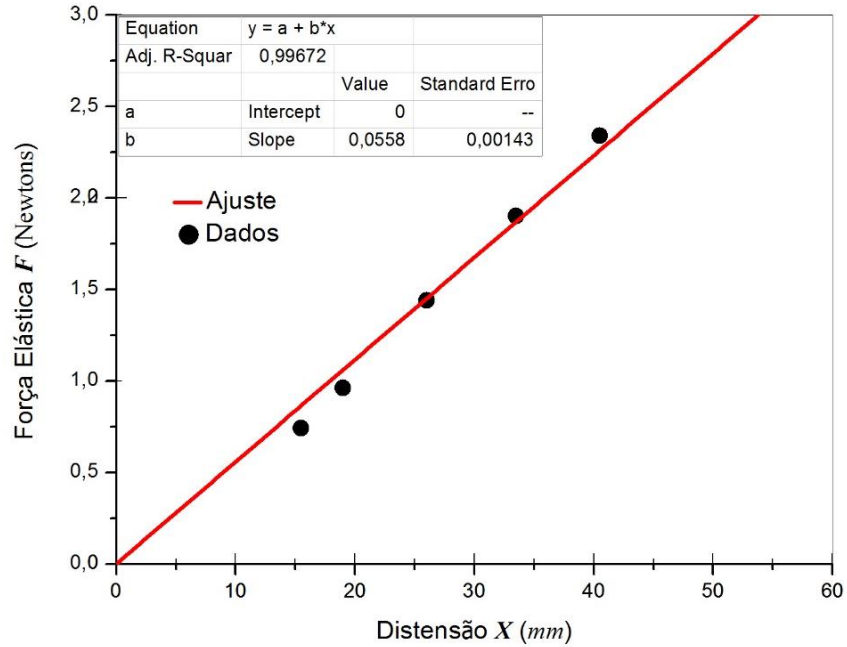
Gráfico 5 - Gráficos da Força (F) pela Distensão (X) com dados experimentais, medida pela turma B e a curva teórica pela equação da Lei de Hook

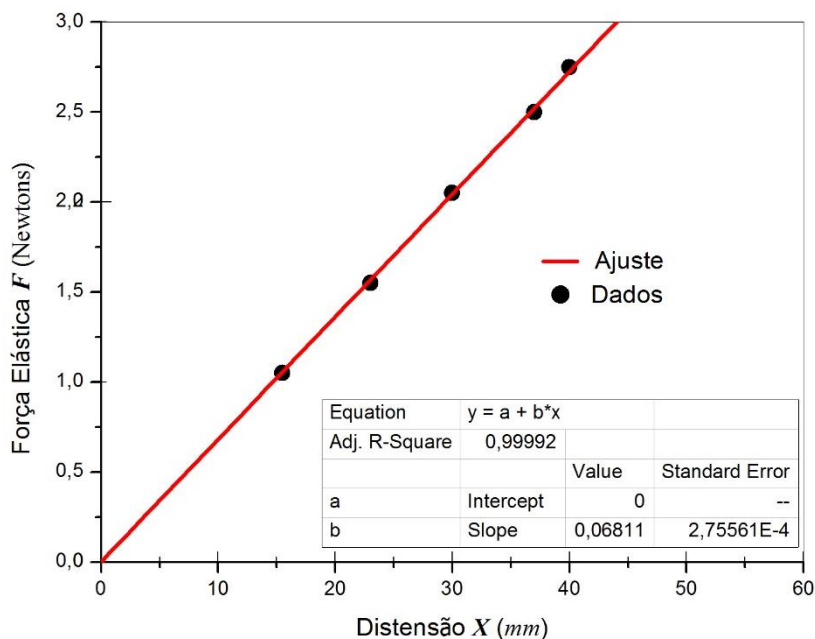




Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

Gráfico 6 - Gráficos da Força (F) pela Distensão (X) com dados experimentais, medida pela turma A e a curva teórica pela equação da lei de Hook





Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

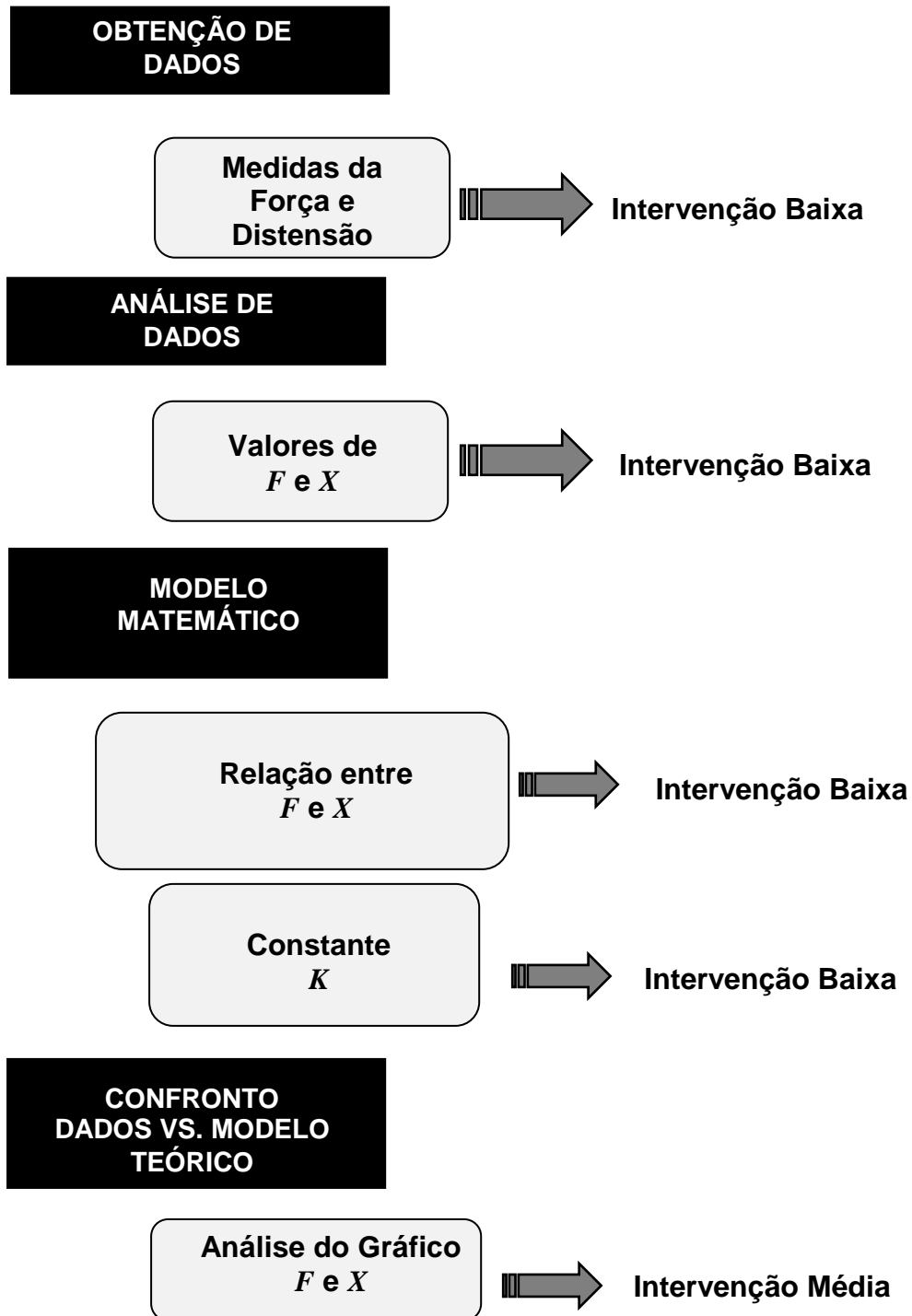
Ambos os resultados estão dentro de padrão de aceitação, considerando os erros de medidas. Tanto para os alunos do curso de ciências (A), quanto do curso de civil (B), os dados coletados foram semelhantes. Uma análise mais aprofundada destes resultados encontra-se na seção de análise qualitativa deste experimento.

4.8.3 Intervenções no Experimento

As intervenções ocorridas neste experimento foram consideradas baixas. Na obtenção dos dados, os alunos tiveram pequenos erros nos procedimentos de medidas, tal como um ponto de referência para a medida de X , assim como erros de paralaxe, por se situarem fora do eixo de leitura da faixa do dinamômetro, porém todos foram sanados com as devidas correções por parte do professor.

Na análise de dados e obtenção do modelo matemático, também ocorreram pequenos erros de investigação, que também foram corrigidos com intervenção baixa. E na última etapa, referente à análise do gráfico ($F \times X$), ocorreram novamente alguns erros de investigação relativos à interpretação da curva teórica (lei de Hook) com a experimental (dados experimentais), que foi possível corrigir com baixa intervenção (Figura 21).

Figura 21 - Intervenções no experimento da Lei de Hook por meio da Modelagem Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.8.4 Análise dos Questionamentos

Acerca da análise qualitativa dos questionamentos feitos por meio de entrevistas, utilizando questionários, foram aplicadas nas duas turmas as mesmas perguntas, porém divididas em duas etapas (cada etapa uma aula), classificadas da seguinte maneira:

PA1: Perguntas feitas após a execução do experimento e obtenção das medidas, porém antes da apresentação do modelo teórico aos alunos do curso de Licenciatura em Ciências Naturais.

PB1: Perguntas feitas após a execução do experimento e obtenção das medidas, porém antes da apresentação do modelo teórico aos alunos do curso de Engenharia Civil.

PA2: Perguntas feitas após a execução do experimento, obtenção das medidas e a apresentação do modelo teórico aos alunos do curso de Licenciatura em Ciências Naturais.

PB2: Perguntas feitas após a execução do experimento, obtenção das medidas, e a apresentação do modelo teórico aos alunos do curso de Engenharia Civil.

Inicialmente, foi questionada a natureza da medida com a grandeza em questão. Nesse caso, foi feita a seguinte pergunta:

PA1 e PB1 - *A força F dividida pela elongação X é constante ou variável?*

Os alunos B foram classificados nas categorias de análises do *modelo* teórico *atuante* e *raciocínio matemático*, pelo fato de uma parte responder com uso da relação F/X , que tem como resultado um valor constante, enquanto que outros afirmam que também é constante, devido à rigidez da mola, apresentando a constante K . Estas são respostas que se basearam no modelo teórico estudado anteriormente em disciplinas de conteúdo teórico, ou seja, sem experimentação.

Grande parte dos alunos A limitou-se apenas a afirmar ser constante, enquanto que outros também afirmaram ser constante, com a justificativa baseada nas medidas, tal como a seguinte resposta de um aluno A1: “*É constante, pois os valores iniciais obtidos na divisão dos valores não alteram*”. O aluno A2 respondeu o seguinte: “*Deve-se apresentar de maneira constante, entretanto devido a pequenos*

erros, pode demonstrar variações”. Como resposta errada, o aluno A3 afirma que: “É variável, a força é proporcional à deformação de X”.

Logo, para as afirmativas corretas, os alunos A basearam-se unicamente nos dados apresentados por suas mediadas. Foi suficiente verificarem que a relação F/X manteve-se aproximadamente constante, tendo noções do erro de investigação, que fazem parte da medida.

Essas conclusões dos alunos A são suficientes como suporte para se chegar ao modelo teórico. A noção de que relação F/X é aproximadamente constante induz à conclusão de um modelo matemático simples envolvendo a linearidade das duas grandezas. As respostas dos alunos diferenciam-se; a turma B busca uma lógica e objetividade nos dados e no modelo físico que já lhe foi apresentado anteriormente, enquanto a turma A baseia-se numa lógica a partir da medida.

Em outro questionamento, foi feita a seguinte pergunta:

PA1 e PB1 - *A força F cresce com a distensão X ? Justifique sua resposta.*

Novamente, os alunos B expõem suas respostas nas categorias do *modelo teórico atuante e raciocínio matemático*, e apresentam o modelo matemático como justificativa para o crescimento linear da força, conforme algumas respostas:

B1: “*Sim, levando em consideração a constante K , temos $K = F/X$ (aumenta), para que o valor se mantenha constante F (aumenta).*”

B2: “*Quanto maior for X , maior será a força que a mola exercerá para voltar ao seu comprimento inicial.*”

B3: “*Sim, Cresce linearmente obedecendo à constante K , que representa a rigidez do sistema*”.

Os alunos A, novamente a partir das medidas obtidas, particularmente da força F , concluíram pelo crescimento proporcional à distensão X , conforme afirmam:

A4: “*Sim, quanto maior a força (F) maior será o distanciamento (X), são proporcionais.*”

A5: “*Sim, elas são diretamente proporcionais*”.

Em ambas as conclusões (A e B), a evidência das medidas se faz presente, pela resposta comum da proporcionalidade da força com a distensão. Trata-se de uma pré-aprendizagem para obtenção do modelo final que, em alguns casos, foi antecipadamente apresentado pelos alunos B, embora os alunos A cheguem próximos à conclusão de um modelo apresentado por B.

E para uma análise da curva F vrs X , sem o conhecimento do modelo teórico,

foi feita a seguinte pergunta:

PA1 e PB1 - *Qual o significado do gráfico ($F \times X$) obtido pela sua medida?*

Os alunos B diversificaram nas respostas, com características matemáticas (propriedades de retas lineares) e físicas (definição da constante K):

B4: *“A curva mostra o comportamento linear-elástico do material ensaiado, sendo que a tangente do ângulo formado pela reta, no gráfico, nos fornece a constante elástica K .”*

B5: *“O significado é uma reta, demonstrado pela equação de $F(X) = K.X$, onde K é o coeficiente angular constante.”*

B6: *“A curva $F \times X$ fornece a constante elástica da mola.”*

Os alunos A responderam baseados na pergunta anterior, que o gráfico obtido é uma relação de crescimento linear entre a força e a distensão:

A6: *“O gráfico mostra que a força e o deslocamento são diretamente proporcionais.”*

A7: *“Representa a variação linear crescente que ocorre com a força F quando se aumenta o alongamento X .”*

Para os alunos A, o entendimento da variação proporcional da força, ao analisarem os resultados medidos, reforça a ideia de linearidade do modelo ao investigarem a natureza do gráfico ($F \times X$). Ao compreenderem que a relação entre as duas grandezas F e X tem como resultado uma constante, facilitou a concluírem por uma função linear para a curva resultante. É evidente que se trata de uma aprendizagem limitada, por não associarem as características físicas da constante da mola. Porém, essa dificuldade foi detectada também nos alunos B, que, embora associem K como constante da mola, acham que as propriedades de K estão sujeitas à força e à distensão e não exclusivamente à mola. Para um entendimento completo dessa teoria, foi necessária a última etapa de aplicação da modelagem matemática, definida como *obtenção do modelo físico* (item 6 - página 66) por meio de uma *intervenção média* do professor.

Após a apresentação do modelo, foram feitas análises comparativas dos dois gráficos, sendo o primeiro representado pela reta teórica da lei de Hook que representa o sistema massa-mola ($F = K.X$) e o segundo representado pelas medidas efetuadas no experimento (gráficos 1 e 2 – páginas 91 e 92). Do exposto, foram feitas as seguintes perguntas:

PA2 e PB2 - *Qual a diferença nos gráficos ($F \times X$) obtidos a partir da equação $F =$*

K.X com o obtido pelas suas medidas a partir do experimento?

Os alunos B destacaram a margem de erro, concebido pelo fato de terem realizado a experiência de teoria dos erros, enquanto que os alunos A destacaram que a grandeza K , apesar de ser constante, sofre pequenas variações com a medida, embora não soubessem responder, quando perguntados, o porquê dessa variação.

Fica claro que os alunos A, que não realizaram o experimento de teoria dos erros, implicitamente têm um entendimento de erros sistemáticos, que influenciam no resultado, quando comparado com o valor teórico.

Outro questionamento apresentado foi do limite para força elástica:

PA2 e PB2 - *Existe um limite para a força elástica? Ela é infinita?*

Para os alunos B, as respostas foram que existe um limite para a força e está associada à natureza da mola:

B7: *“Sim. Ela não é infinita. Ao atingir certo valor a mola se rompe e não volta ao seu estado inicial.”*

B8: *“Sim. O limite é a resistência da mola.”*

E os alunos A, apresentaram resposta semelhante ao definirem o limite de resistência da mola:

A8: *“Existe um limite, pois o material sofrerá deformação.”*

A9: *“Sim, existe um limite que vai depender da capacidade de distensão da mola.”*

Nesse estágio, os alunos demonstram entender a diferença do modelo matemático para o modelo físico, cujo limite está na medida. Eles compreenderam que a mola não pode se estender indefinidamente sem um estágio de deformação permanente.

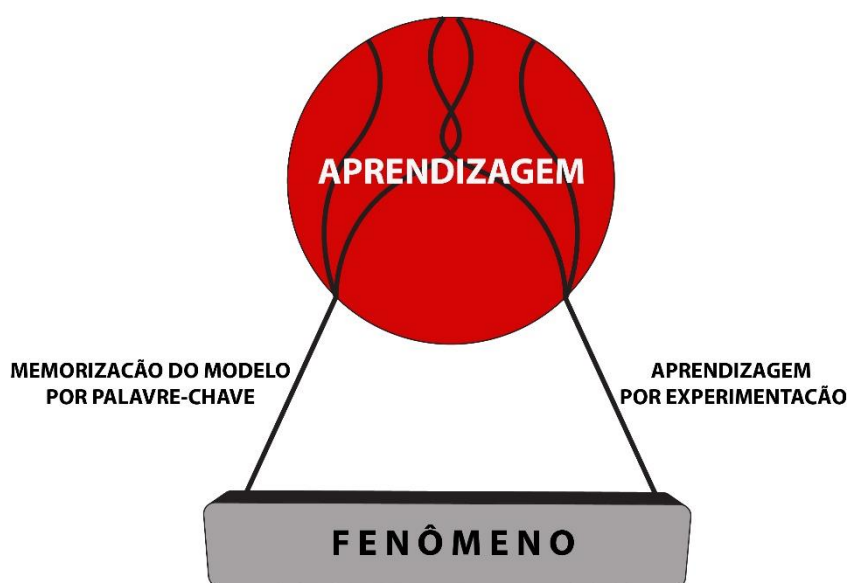
No contexto geral da análise dos questionamentos, a turma B obteve um rendimento vantajoso em relação à turma A, pelo fato de terem realizado uma disciplina de suporte ao conteúdo experimental investigado. Esta vantagem se manifestou pelo conteúdo matemático associado ao modelo físico que torna o entendimento mais acessível. Em alguns casos, a justificativa dos alunos da turma B para o fenômeno se manifestava de imediato com o modelo teórico, de modo que eram questionados a explicar melhor a adesão do modelo ao fenômeno. Assim, percebemos que não se tratava de uma aprendizagem imediata, mas de uma memorização do conteúdo por meio das palavras-chave.

Quando, por exemplo, foi apresentado o fenômeno da distensão elástica da mola, de imediato veio à mente dos alunos a lei de Hook, já estudada anteriormente. Essa atitude é justificada pelo fato de ao atraírem suas atenções com as palavras “distensão”, “elástica” e “mola”, automaticamente lembraram-se da lei de Hook. Com isso, houve certo relaxamento e acomodação, em suas atitudes, pelo fato de acharem que, associando o modelo teórico ao fenômeno, já havia o entendimento do que realmente estava ocorrendo no processo.

Para os alunos A, aconteceram entendimentos sem a memorização das palavras-chave, devido à ausência do modelo teórico até então não apresentado. Neste caso, ocorreu uma memorização da aprendizagem, baseada na relação matemática obtida a partir dos dados coletados do experimento (figura 22).

Porém, é bom salientar que a memorização do conteúdo (ou do modelo) por meio das palavras-chave não se trata de uma forma errada de aprender o fenômeno, ao contrário, facilita no sentido de identificar o modelo teórico, porém deve ser acompanhado pelo professor para que se evite a ingenuidade do aluno concluir que entendeu apenas pela identificação do modelo com o fenômeno. Por outro lado, também a aprendizagem pela experimentação, ou seja, somente a partir dos dados medidos, sem a ausência do modelo, não é suficiente para o total entendimento do processo. Assim, faz-se necessária uma complementação junto ao modelo teórico.

Figura 22 - Características da aprendizagem com uso da MM na experimentação



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

É importante destacar que a figura 22 não se trata de um modelo de aprendizagem utilizando a experimentação como metodologia, e sim uma proposta de explicação baseada na investigação de uma estratégia de ensino, com uso da modelagem matemática em que surgem determinadas características que julgamos serem importantes para a aprendizagem do conteúdo experimental.

Portanto, o uso da modelagem neste experimento produziu aprendizagem considerada satisfatória para as duas turmas. Por meio dos resultados dos gráficos 1 e 2, é possível perceber que os erros aleatórios estão na mesma faixa de aceitação para esse tipo de experimento e que o entendimento do modelo físico ao fenômeno apresentado satisfaz o conhecimento necessário que o aluno deve possuir para o entendimento do processo.

4.9 Experimento de Movimento Retilíneo Uniforme (M.R.U.)

Este experimento, semelhante ao anterior, apresenta um modelo teórico envolvendo três grandezas físicas, espaço, tempo e velocidade, que se relacionam numa equação linear, a chamada equação horária do movimento retilíneo uniforme (M.R.U.).

A investigação foi direcionada a alunos do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará e o local, o Laboratório de Física Ensino da Faculdade de Física. A distribuição foi de cinco alunos por quatro bancadas e cada bancada forma um grupo (1, 2, 3, e 4), totalizando 20 alunos.

4.9.1 O Experimento

O experimento é composto de um módulo de M.R.U., cronômetro e um pequeno ímã para atracamento do objeto esférico que se movimenta. O módulo é composto de uma trajetória de escala milimetrada, na qual está inserida água que contém uma esfera de aço e uma bolha de ar, considerando o fato de o módulo admitir uma trajetória reta entre os pontos de referência (M.R.U.).

O material foi distribuído aos alunos (por equipe) e as bancadas foram posicionadas na forma retangular, para facilitar o acesso do professor e a interação entre os alunos.

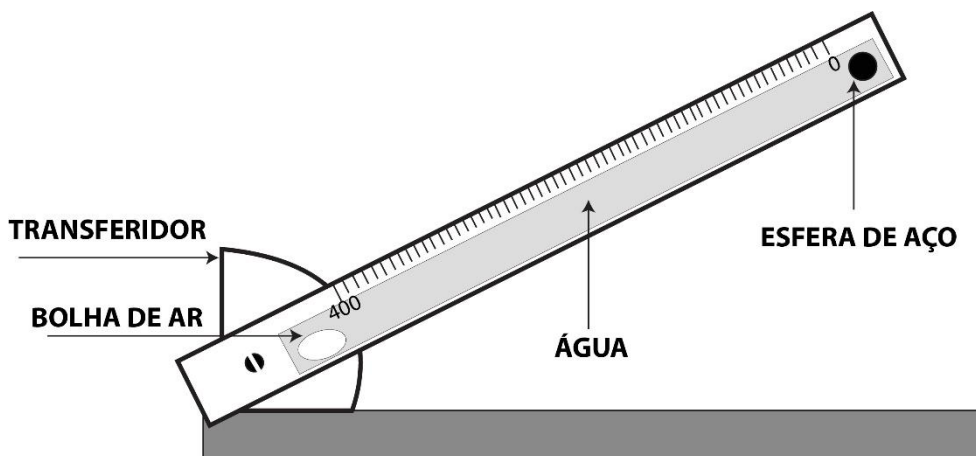
4.9.2 Modelagem Matemática no Experimento

Apresentação do Fenômeno - É apresentado ao aluno o fenômeno relativo ao movimento de um corpo, com algumas indagações: O que caracteriza o movimento de um corpo? Quais grandezas físicas que possivelmente estão envolvidas? É possível que alguma grandeza mantenha-se constante ou variável durante o deslocamento do corpo de um ponto a outro?

É importante destacarmos que estas indagações foram apresentadas de forma oral, como uma espécie de sugestão para a investigação, para que não se repetissem erros de amarrar, desde o início, os objetivos a serem investigados, como apresentado nos roteiros.

Execução do experimento e Obtenção de Dados - para executar o experimento, foi disponibilizado aos alunos o módulo do M.R.U., composto de um plano inclinado, fixo num ponto de rotação junto com um transferidor para medida da inclinação (em torno de 10 graus). Na da parte móvel externa, contém uma régua milimetrada com escala de 0 - 400 mm e na interna um fluido (água) com uma esfera de aço e uma bolha de ar (figura 23).

Figura 23 - Experimento do M.R.U.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

O objetivo do experimento é medir o tempo (t) quando a esfera e a bolha se deslocam a partir de 0 e 400 mm, respectivamente, a cada 50 mm até extremidade da escala. Na fase de coleta de dados, ocorreram pequenos erros de ação, porém não comprometeram seus resultados.

Análise dos dados - a partir dos dados coletados, os alunos analisaram a coerência das medidas; caso algum valor das grandezas esteja com uma flutuação alta ou baixa, inviabiliza o entendimento do modelo final, porém nenhum erro dessa natureza foi detectado (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5 - Resultados de algumas medições do Deslocamento (X) e Tempo (t), do movimento da esfera de aço

MEDIDA	DESLOCAMENTO X (mm - milímetro)	TEMPO t (s - segundos)
1	50	1,28
2	100	2,53
3	150	3,81
4	200	5,15
5	250	6,47
6	300	7,78
7	350	9,00
8	400	10,16

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

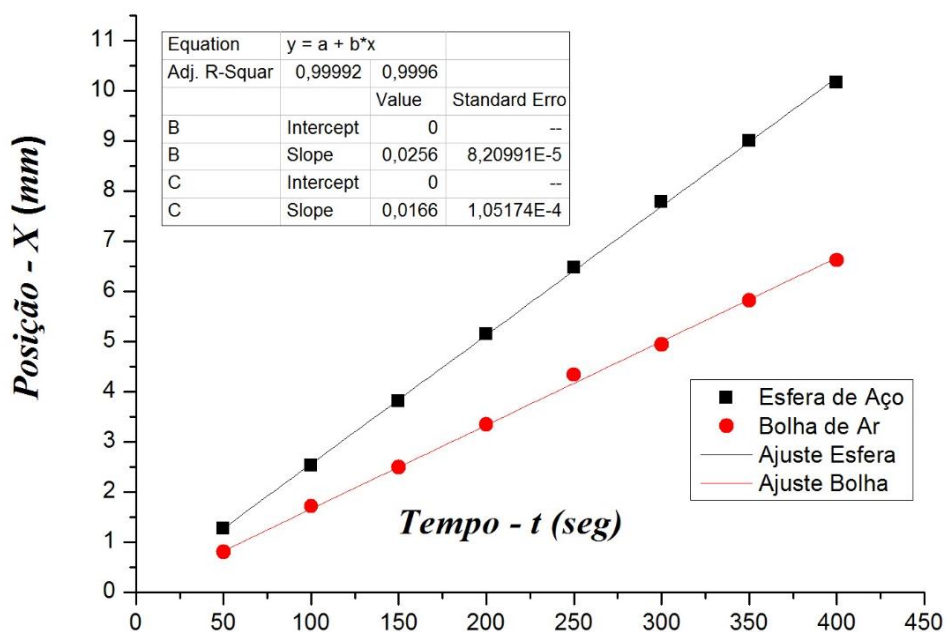
Tabela 6 - Resultados de algumas medições do Deslocamento (X) e Tempo (t), do movimento da bolha de ar

MEDIDA	DESLOCAMENTO X (mm - milímetro)	TEMPO t (s - segundos)
1	50	0,81
2	100	1,72
3	150	2,5
4	200	3,35
5	250	4,34
6	300	4,94
7	350	5,82
8	400	6,62

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

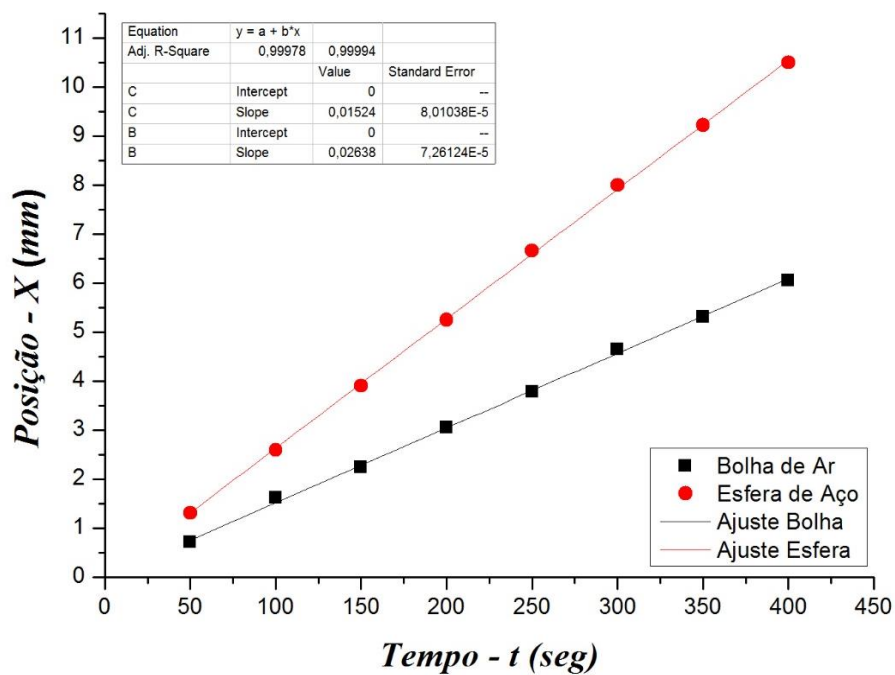
Obtenção do Modelo Matemático - nessa etapa, o aluno foi orientado a obter um modelo a partir da análise dos dados quantitativos obtidos na etapa anterior. Por meio da operação de dividir a coluna do deslocamento pelo do tempo, tiveram noção dos conceitos de invariância do movimento e da velocidade. Apesar da flutuação dos resultados, foi possível um entendimento efetivo do significado da operação matemática. E ainda nesta etapa, os alunos foram orientados a traçarem o gráfico X x t , a fim de entenderem melhor o comportamento do modelo matemático (Gráficos 7 e 8).

Gráfico 7 - Gráficos de algumas medidas do Deslocamento (X) vrs Tempo (t), do movimento da esfera de aço e da bolha de ar



Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

Gráfico 8 - Gráficos de algumas medidas do Deslocamento (X) vrs Tempo (t), do movimento da esfera de aço e bolha de ar



Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados pelos alunos (2014).

Nos gráficos obtidos, foi feito um ajuste dos dados por uma função linear, para que o modelo matemático estivesse dentro do padrão aceito pelo modelo físico a ser validado.

Uma análise mais aprofundada desses resultados faz parte da análise qualitativa dos questionários que compõem a última seção deste experimento.

Confronto com o Modelo Teórico - Nessa etapa, o professor apresentou o modelo teórico do M.R.U. a partir da operação matemática realizada na etapa anterior, valendo-se de que se o resultado é constante e a entidade física será a velocidade (v) dos objetos, ou seja, para uma variação do valor de X dividido pelo tempo t o resultado será aproximadamente constante, e origina a equação horária.

$$\Delta X / t = v$$

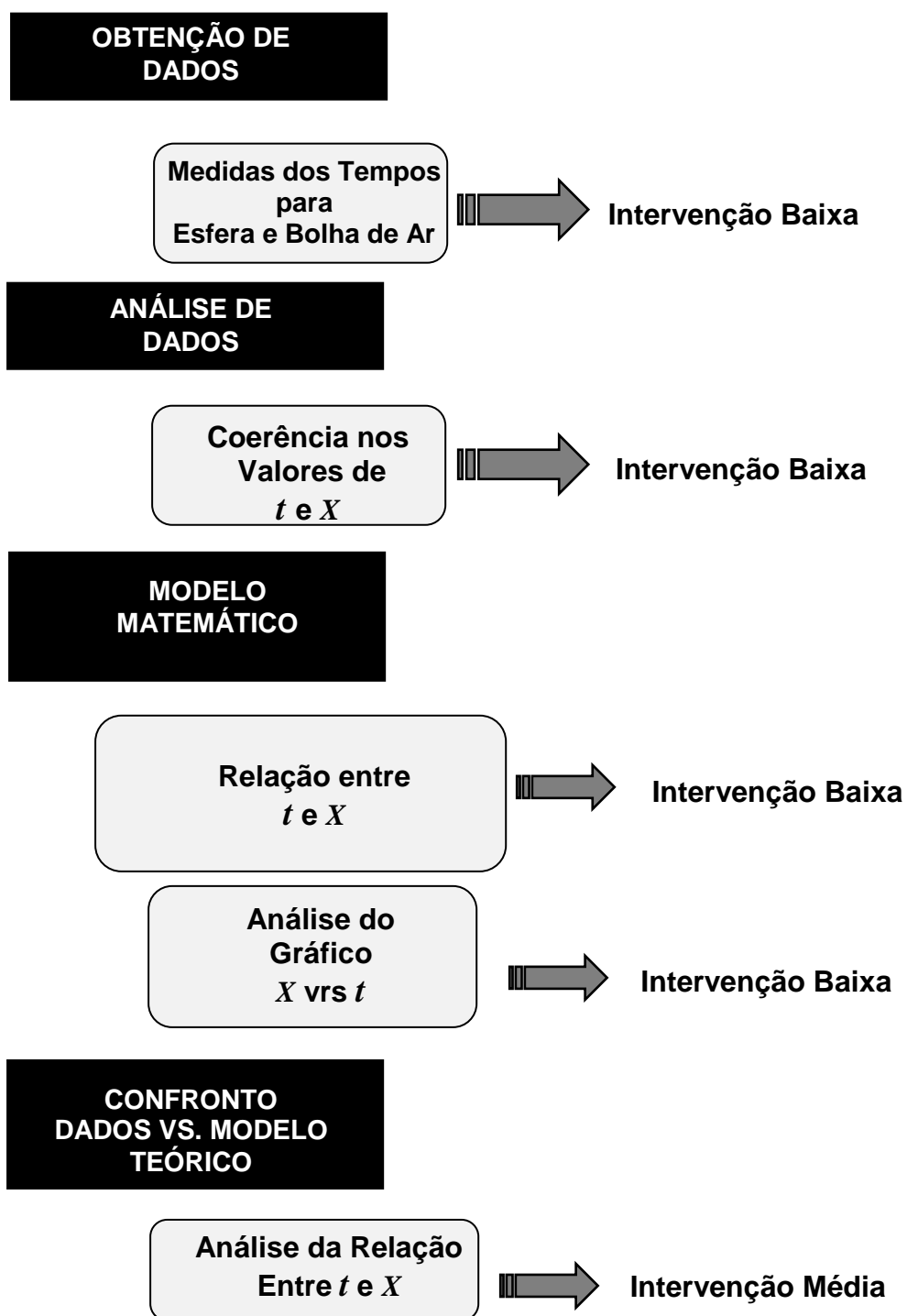
Comparado este resultado com os ajustes apresentados pelos gráficos 7 e 8, a validação do modelo encontrado pelos alunos está dentro de um padrão aceitável ao entendimento do fenômeno.

4.9.3 Intervenções no Experimento

As intervenções ocorridas neste experimento foram consideradas baixas. Na obtenção dos dados, os alunos cometeram erros aceitáveis que não, necessariamente, comprometem a experiência, tais como erro de paralaxe e localização dos objetos antes de movimentarem-se. Na análise de dados, a coerência dos valores obtidos para as medidas do tempo dos dois objetos (esfera e bolha de ar) ficaram na faixa da normalidade.

Na obtenção do modelo matemático, alguns alunos até se anteciparam a entenderem um modelo físico, devido a estudos anteriores e à análise gráfica. Nesta etapa, o professor pouco interveio, apenas com orientações que julga normal. E na última etapa, referente à análise do confronto dos dados coletados com o modelo teórico, novamente se sucederam intervenções baixas, fato que os alunos já estavam de posse do modelo matemático, que facilitou o entendimento conceitual (Figura 24).

Figura 24 - Intervenções no experimento do M.R.U. por meio da Modelagem Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

4.9.4 Análise dos Questionamentos

Na análise qualitativa dos questionamentos feitos por meio de entrevistas, foram utilizados questionários aplicados após a coleta de dados e antes da apresentação do modelo teórico.

Inicialmente, foi questionado o conceito de movimento. Nesse caso, foi feita a seguinte pergunta:

P1 - *O que você entende por movimento de um corpo?*

A maioria das respostas foi de associar o deslocamento de um corpo a partir de uma determinada posição a outra. Embora não tenham especificado que o deslocamento, neste caso, depende do referencial, consideramos como uma resposta de requisitos mínimos ao entendimento do conceito. Algumas das respostas dos alunos foram:

R1: *“Como o deslocamento de um corpo de um ponto a outro.”*

R2: *“Deslocamento de uma posição A para uma posição B.”*

R3: *“O deslocamento de um corpo em uma distancia X em um tempo t.”*

É provável que algumas das respostas tenham se baseado no modelo teórico, anteriormente estudado nas disciplinas de Física básica, ou até mesmo no ensino fundamental, o que reforça a ideia de que no processo de MM, a apresentação do fenômeno força o aluno a buscar em seus conhecimentos o provável modelo que está associado a uma possível solução.

Numa segunda pergunta, foi questionada a caracterização da trajetória:

P2 - *Que tipo de curva caracteriza a trajetória de um corpo em movimento retilíneo?*

Apesar de a pergunta induzir à resposta, e a maioria ter respondido “a reta”, ocorreram algumas conclusões incompletas, tais como:

R4: *“Um corpo em movimento retilíneo tende a percorrer uma trajetória unidimensional.”*

R5: *“A trajetória é analisada como espaço percorrido por um corpo entre dois pontos fixos.”*

São respostas insuficientes e que se caracterizam pela memorização por palavra-chave (figura 22 - página 103), ou seja, na ausência de uma resposta objetiva, o aluno associou a palavra “trajetória” às palavras “unidimensional” e “espaço percorrido”.

Em outra pergunta, foi questionado, indiretamente, o conceito de velocidade:

P3 - *Considerando um corpo que se desloca entre dois pontos num determinado tempo e numa trajetória retilínea, você saberia identificar o que caracteriza este movimento, por meio de uma grandeza física?*

E a partir da análise dos dados foram geradas, também, algumas respostas indiretas para o conceito de velocidade constante.

R6: *“O que caracteriza o movimento são as grandezas físicas espaço percorrido, tempo e velocidade.”*

R7: *“Sim, o movimento caracteriza-se pelo espaço e tempo que origina a grandeza velocidade.”*

R8: *“Sim, a divisão da variação do espaço num determinado tempo é aproximadamente uniforme.”*

R9: *“Sim, pois tendo conhecimento de espaço e tempo o resultado da relação dos dois foi um resultado constante.”*

Neste estágio, os alunos já haviam medido o tempo para uma determinada trajetória e operacionalizado a divisão do espaço pelo tempo, concluindo pelo resultado constante dessa operação, com os devidos erros de flutuação. Apesar de ainda não se ter, formalmente, apresentado o modelo teórico, foi possível a maioria dos alunos entender o conceito de velocidade, mesmo não o associando, especificamente, à referida grandeza.

Nesta etapa de uso da modelagem, consideramos que o aluno atingiu o nível de obter um modelo matemático a partir do manuseio dos dados coletados. Novamente, consideramos esta como uma resposta que apresenta requisitos mínimos ao entendimento do conceito físico.

Outra pergunta foi feita acerca da diferenciação do espaço que um objeto percorre e a posição que ele ocupa num determinado instante:

P4 - *Qual a diferença entre espaço percorrido e posição?*

No experimento, foi feito um procedimento em que se analisou o tempo de encontro entre os dois objetos (esfera e bolha), a fim de estimular o aluno a entender o conceito de espaço percorrido e posição, apresentando as seguintes respostas a partir destes resultados:

R10: *“Posição compreende um exato ponto onde está situado um corpo. E o espaço*

percorrido é a distância que o dito corpo percorre até uma posição.”

R11: *“Posição é um ponto fixo no espaço. Espaço percorrido é o espaço compreendido entre dois pontos de deslocamento.”*

Espaço percorrido e posição são conceitos que geram confusão de entendimento por parte dos alunos. Ao medirem o tempo de encontro entre os dois objetos, a compreensão foi facilitada pela situação de transpor o conceito à prática. Na maioria das respostas, os alunos definiram a posição como ponto de localização, equivalente ao ponto de encontro da esfera com a bolha, enquanto para o espaço percorrido, equivaleu a medida do espaço que a bolha e a esfera percorreram até o ponto de encontro.

Na análise gráfica, foi perguntado o sentido característico do gráfico X vrs t :

P5 - Qual o significado do gráfico X x t ?

As respostas se dividiram em definir a velocidade e variação da posição dos corpos durante seus movimentos:

R12: *“O gráfico X x t ilustra o tempo necessário para que tal objeto, em movimento retilíneo, alcance certa posição.”*

R13: *“O gráfico X x t mostra a variação da posição de determinado corpo em função do tempo, sendo que a tangente do ângulo formado entre a reta e o eixo é numericamente igual a velocidade do corpo.”*

Um erro comum na análise gráfica é achar que X é a trajetória do móvel num determinado tempo. Como foram feitas medidas de cada instante do deslocamento do objeto, facilmente os alunos entenderam que se tratava do posicionamento dos corpos para seus respectivos tempos. Trata-se de um ganho de aprendizagem eficiente no ensino experimental, pelo fato de ser um estudo tradicional de sala de aula.

4.9.5 Categorias de Análise

Nesta etapa, destacamos quatro categorias identificadas nas ações e raciocínio dos alunos. Algumas se destacam pela aprendizagem e outras pelos erros cometidos. No Quadro 13, encontram-se as categorias associadas às ações dos alunos.

Quadro 13 - Categorias de análise

Descrição	Categoria
Alguns alunos demonstraram ter conhecimentos fragmentados de movimento e velocidade.	Modelo teórico atuante
Alunos construíram modelo linear que relaciona espaço e tempo.	Raciocínio pelos dados experimentais.
<ul style="list-style-type: none"> - Localização dos objetos em relação à linha de referência na trajetória. - Ponto de encontro dos objetos quando se movimentam em sentidos contrários. 	Raciocínio por simetria
<ul style="list-style-type: none"> - Ponto de partida errada. - Erros de paralaxe na localização. - Falta de sincronismo entre observação e ato de medir. 	Erros de ação.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da coleta de dados (2015).

4.10 Análise do Aluno como Cientista Normal nos Experimentos

O aluno como cientista normal deverá interpretar situações e resolver problemas nas atividades experimentais, tendo como referência uma teoria, que é introduzida e consolidada no decorrer do experimento, assim como o desenvolvimento das habilidades experimentais.

A Modelagem como estratégia de ensino permitiu identificar que o aluno desenvolve características de um cientista normal, assim como, na abordagem Arruda; Silva e Laburú (2001), também baseados nas ideias de Kuhn, para o laboratório didático de Física.

No quadro 14, as propostas de Zylbersztajn (1991) e Arruda; Silva e Laburú (2001) são associadas a ações características identificadas nos alunos e nos experimentos realizados nesta investigação, com uso da Modelagem.

Quadro 14 - Ações características e propostas por experimento

Experimentos	Propostas	Ações
Teoria de Erros	Aluno como um cientista normal.	- Manuseio de equipamento e análise estatística de dados. - Desenvolvimento do Referencial Teórico. - Apresentação do modelo teórico.
	Medições em geral.	- Medidas das dimensões do objeto.
	Construção de novos óculos teóricos.	- Aprendizagem dos erros sistemáticos e aleatórios. - Aprendizagem do valor de uma medida pelo intervalo de incerteza.
Momento de Inércia	Aluno como um cientista normal.	- Manuseio de equipamento e análise estatística de dados. - Desenvolvimento do Referencial Teórico. - Apresentação do modelo teórico.
	Produção de fatos que se ajustam ao paradigma.	Medidas das grandezas relativas às dimensões e que possibilitou o cálculo de outras grandezas, inseridas no modelo teórico.
	Medições em geral.	Medidas de dimensões e tempo de rolagem dos objetos.
	Construção de novos óculos teóricos.	Conceito de Rotação de um corpo e suas causas.
Lei de Hook	Aluno como um cientista normal.	- Manuseio de equipamento e análise estatística de dados.

		<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento do Referencial Teórico. - Apresentação do modelo teórico.
	Produção de fatos que se ajustam ao paradigma.	Obtenção da curva ($F \times X$) por meio de ajustes dos dados experimentais.
	Articulação da teoria por meio da determinação de constantes físicas, descobertas de leis empíricas e medições em geral.	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo da constante de elasticidade da mola (K). - Aprendizagem da Lei de Hook. - Medidas da grandeza força (F).
	Construção de novos óculos teóricos.	<ul style="list-style-type: none"> - Conceitos de distensão elástica. - Conceito matemático de linearização do modelo.
M. R. U.	Aluno como um cientista normal.	<ul style="list-style-type: none"> - Manuseio de equipamento e análise estatística de dados. - Desenvolvimento do Referencial Teórico. - Apresentação do modelo teórico.
	Produção de fatos que se ajustam ao paradigma	Adaptação da trajetória para obter um movimento constante.
	Articulação da teoria por meio da determinação de constantes físicas e medições em geral.	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo da velocidade a partir de dados experimentais. - Medida da grandeza tempo no espaço percorrido.
	Construção de novos óculos teóricos.	Conceitos de espaço percorrido e posição do objeto em movimento.

Portanto, o Quadro 14 mostra que o aluno está inserido na proposta de Kuhn, para ciência normal, e o professor induz o aluno à validação do paradigma, embora não o faça de maneira direta e sim por meio do paralelismo, considerando a experimentação confrontada com o modelo teórico, em que as evidências da aprendizagem são satisfatórias.

Observa-se, também, que o uso da Modelagem nesta estratégia de ensino, permitiu que experimentação e teoria estivessem de acordo com as ideias de Kuhn, visto que, considerar o paralelismo das duas num processo de ensino e aprendizagem, só é possível com uma metodologia aberta em relação ao ensino tradicional. Dependendo da complexidade do experimento, é possível ao aluno chegar, ou não, ao modelo teórico, porém acima disso, está a aprendizagem das grandezas físicas que compõem o modelo. Entender o significado das grandezas é um grande feito para se obter o modelo teórico, com ou sem a intervenção do professor.

A Modelagem Matemática, associada às abordagens de Zylbersztajn (1991) e Arruda; Silva e Laburú (2001), pode acontecer de forma mesclada. Neste trabalho de investigação, foi admitido o *aluno como cientista normal* em face da natureza das aulas experimentais e dos projetos pedagógicos, que direcionam a um conteúdo pré-definido.

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, o ensino de Física experimental no laboratório didático de Física segue o padrão da metodologia da pesquisa, que procura verificar leis e teorias com base na experimentação. Trata-se de um modelo que apresenta deficiências, principalmente na dependência de roteiros ou manuais e quando se propõe a apresentar o modelo teórico como o objetivo a ser atingido, de modo a fazer com que a aprendizagem do aluno direcione-se para a técnica da medida. Com o processo de modelagem matemática, a busca desse modelo não é, de imediato, o foco principal; porém, para obtê-lo, ocorrem descobertas de conhecimentos essenciais à aprendizagem.

Em nossa proposta, para o ensino laboratorial de Física com uso da modelagem matemática, o ensino experimental ganha importância, por tratar o modelo teórico de forma paralela à experimentação. Acreditamos que a modelagem matemática como estratégia de ensino de Física experimental é vantajosa, embora acompanhada de uma importante ação indutiva por parte do professor, o que nos leva considerar a:

a) não esperar que o aluno chegue ao modelo físico, de forma independente, mas somente a partir dos dados experimentais obtidos, sem qualquer intervenção do professor.

O modelo físico está envolto de outros conceitos, tais como informações e variáveis que não estão envolvidas nos dados coletados.

No caso de experimentos cujos modelos físicos são lineares, como os envolvidos na investigação (M.R.U. e Lei de Hook), as grandezas se diferem pela proporção de uma constante. E esta constante já possui determinados valores conceituais agregados, que torna difícil uma justificativa física, somente com os valores numéricos.

Esta dificuldade aumenta com leis que não envolvem a proporcionalidade por uma constante, como é o caso do experimento de momento de inércia, em que a complexidade do modelo, exige uma alta intervenção do professor.

Portanto, neste processo de aprendizagem do paralelismo da teoria e experimento com uso da Modelagem, não devemos confundir o princípio que envolve o método da pesquisa com o da estratégia de ensino. No primeiro, são

feitas inferências conceituais para serem testadas, modificadas, validadas ou refeitas, se for o caso. No segundo, a Modelagem permite um ganho de aprendizagem do significado das grandezas que constituem o fenômeno (blocos conceituais – figura 25) e, dependendo da complexidade do experimento, do próprio modelo físico.

b) perspectiva de que o modelo teórico terá de ser apresentado, em paralelo à experimentação, com todo seu formalismo analítico por meio das leis, teoremas, valores e regras que descrevem a natureza de um fenômeno físico.

É importante destacar que não se trata de exaltar a experimentação em relação à teoria ou vice-versa, por considerarmos que ambas, como ficou evidente nessa investigação, possuem um papel de completude na aprendizagem dos conteúdos.

c) questão do conhecimento empírico individual do aluno, que se faz necessário para o entendimento da funcionalidade do experimento.

O levantamento das concepções prévias dos alunos é recomendável com uso da Modelagem, devido ser possível introduzir anomalias para gerarem dúvidas, com etapa inicial ao desenvolvimento da aprendizagem e habilidades próprias.

Em nossa investigação do uso da modelagem como estratégia de ensino, o papel do professor, como elemento que intervém de maneira efetiva, colabora também para a necessidade de uma continuidade desta linha investigatória. O desenvolvimento de habilidades cognitivas, por meio de formulação e testes de hipóteses com pouca intervenção, merece ser investigado com maior ênfase e acreditamos que a Modelagem inserida neste processo pode vir a ser um viés para a continuação e aperfeiçoamento desta proposta.

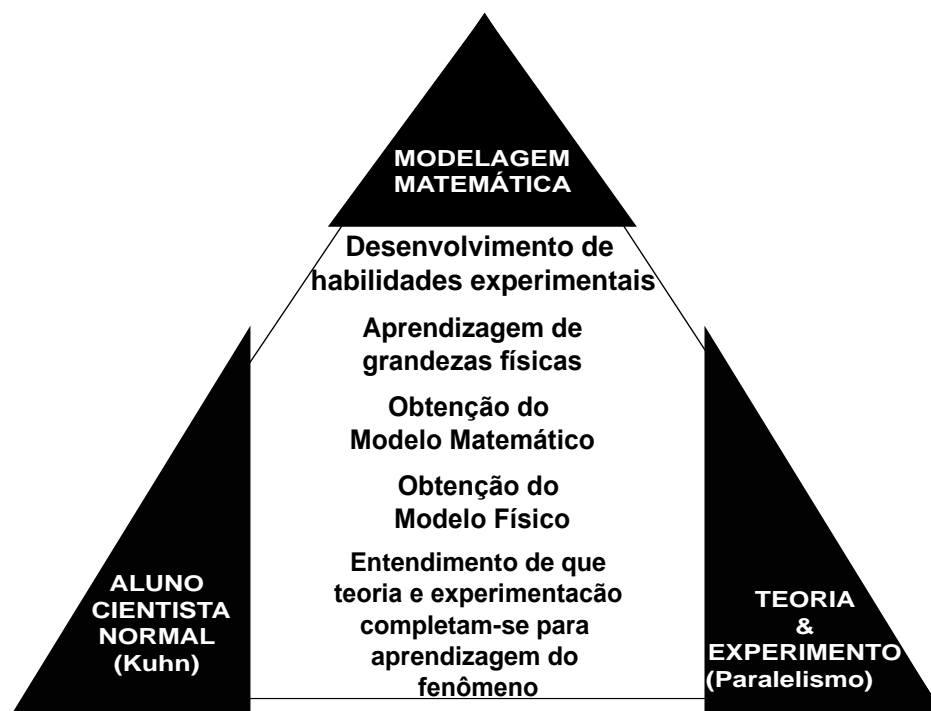
Além da intervenção do professor, destacamos a proposta de Zylbersztajn (1991) a partir das ideias de Kuhn (2011a), que considera o aluno como cientista normal, que possibilitou o desenvolvimento de habilidades experimentais, como manuseio de equipamentos, interpretação de dados, análises gráficas e elaboração de relatórios; além da aprendizagem do referencial teórico que foi sendo introduzido e consolidado no decorrer da execução da disciplina experimental.

Na concepção do laboratório de Física, o aluno é convencido a aceitar o paradigma por meio dos argumentos que o professor apresenta do modelo físico.

Não se trata apenas de apresentar o modelo previamente definido, como parte do conteúdo das disciplinas experimentais e sim romper com o tradicionalismo do ensino que apresenta métodos baseados em roteiros. O convencimento do professor para com o aluno fez parte do processo de intervenção em nossa proposta de considerar a Modelagem como estratégia de ensino (figura 25).

Esta afirmação ficou evidente quando da consideração do paralelismo entre teoria e experimentação. Pelos resultados de nossa investigação, as duas se completam ao desenvolverem no aluno o entendimento do significado do modelo físico a partir de dados coletados. Trata-se de um processo que se encadeou pela percepção do significado das grandezas físicas a partir dos resultados obtidos no experimento.

Figura 25 - Infográfico dos resultados obtidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

Destacamos, ainda, que a investigação limitou-se ao estudo de modelos lineares pela relação de duas grandezas físicas com uma constante, que torna a aprendizagem para obtenção do modelo teórico mais fácil em relação a modelos complexos, como os que envolvem equações algébricas de grau 2.

Do exposto, ficou evidente que só foi possível a proposta de utilizar o modelo teórico paralelo à experimentação, sem que a primeira se sobressaia na segunda, ou vice-versa, com o uso da Modelagem Matemática.

Na proposta de Chaves; Espírito Santo (2011), adotada neste trabalho, o professor assumiu as duas primeiras etapas, sendo responsável pela escolha do tema e elaboração da situação-problema. Além disso, considerando outras situações já citadas, faz com que esta abordagem esteja de acordo com a proposta por Kuhn (2011a), que considera o aluno como cientista normal. Logo, esta abordagem trata-se da aglutinação de duas ideias com pontos em comum no ensino e aprendizagem de Física experimental, o que torna possível se obter um aprimoramento nesta metodologia e concluir pela aprendizagem suficiente para o entendimento do fenômeno. Assim como a extensão para o ensino médio é considerada como uma continuidade adequada do uso modelagem como estratégia de ensino de conceitos físicos auxiliados pela experimentação.

Portanto, é essencial que propostas desta natureza sejam estendidas ao âmbito da sala de aula, a fim de que possamos vivenciar abordagens alternativas e, quiçá, mais efetivas para o ensino de Física.

Outro aspecto da modelagem como estratégia de ensino é reconhecer a aglutinação entre a proposta de Zylbersztajn (1991) - baseada nas ideias de Kuhn (2011a), que considera o aluno como *cientista de uma revolução* - com as possibilidades de Chaves e Espírito Santo (2011); para estes, cabe ao professor o aumento da transferência de tarefas ao aluno, como solução ao problema apresentado. Entendemos que essa proposta é uma continuidade deste trabalho de tese.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, JÚNIOR G. A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Barueri, SP: Manole, 2008.
- ALVES FILHO, J. P. Regras da Transposição Didática Aplicadas ao Laboratório Didático, **Caderno Catarinense de Física**, Florianópolis, v. 17, n. 2, 2000.
- ANDRADE, J. A. N.; LOPES, N. C.; CARVALHO, W. N. P. Uma Análise Crítica do Laboratório Didático de Física: A Experimentação como Ferramenta para uma Cultura Científica. In: ENPEC, 7., [**Anais...**] Florianópolis, 2009.
- ARRUDA, S. M.; SILVA, M. R.; LABURÚ, C. E. Laboratório Didático de Física, A Partir de Uma Perspectiva Kuhniana. **Investigação em Ensino de Ciências**, São Paulo, v. 6, n. 1, 2001.
- AZEVEDO, H. L. et al. O Uso do Experimento no Ensino de Física: Tendências a Partir do Levantamento dos Artigos em Periódicos da Área no Brasil, In: ENPEC, 7., [**Anais...**] Florianópolis, 2009.
- BARATTO, A. C. (Organizador). **GUN - Guia para a Expressão de Incerteza e Medição**. Rio de Janeiro: IMETRO, 2012.
- BARBOSA, J. C. O que pensam os professores sobre a Modelagem Matemática? **Ketetiké**, Campinas, v. 7, n. 11, p. 67-85, 1999.
- BARBOSA, J. C. Modelagem na Educação Matemática: Contribuições para o Debate Teórico. In: REUNIÃO ANUAL DA ANPED, 2001, [**Anais...**], Caxambu, 2001.
- BARBOSA, J. C. Modelagem Matemática na Sala de Aula. In: ENCONTRO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, [**Anais...**] Recife, 2004.
- BARBOSA, J. C. Modelagem e Modelos Matemáticos na Educação Científica. **Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 2, n. 2, , 2009.
- BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com Modelagem Matemática: uma nova estratégia**. 3. ed. São Paulo: Contexto. 2009.
- BICUDO, M. A. V. Pesquisa Qualitativa e Pesquisa Quantitativa segundo a Abordagem Fenomenológica. In: BORBA, M. C.; ARAÚJO, J. L. **Pesquisa Qualitativa em Educação Matemática**. 2. ed. Belo Horizonte: Autêntica, 2006.

BIEMBENGUT, M. S.; HEIN, N. **Modelagem Matemática no Ensino**. 5. ed. São Paulo: Contexto, 2009.

BLOOR, D. **Conhecimento e Imaginário Social**. São Paulo: UNESP, 2010.

BOGDAN, R.; BIKLEN, S. **Investigação Qualitativa em Educação**. Porto, Portugal: Porto, 1991.

BORGES, A. T. Novos Rumos para o Laboratório de Ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino da Física**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 291-313, dez. 2002.

BUNGE, M. **La Investigación Científica**. 2. ed. Barcelona: Ariel, 1989.

_____. **Teoria e Realidade**. 1. ed. São Paulo: Perspectiva, 2008.

CAMPOS, L. S.; ARAÚJO, M. S. T. Modelagem Matemática e a Experimentação Aplicada ao Ensino de Física. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 8., [**Anais...**] Florianópolis, 2009.

CAMPOS, L. S.; ARAÚJO, M. S. T. Articulações Entre o Ensino de Matemática e de Física. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 8., [**Anais...**], Campinas, 2011.

CARVALHO, G. D. **Aula de Física, Do Planejamento à Avaliação**. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

CARVALHO, A. M. P. et al. **Ensino de Física**. São Paulo: Ática, 2010.

CHAVES, M. I. A.; ESPÍRITO SANTO, A. O. Um Modelo de Modelagem Matemática para o Ensino Médio. In: CONGRESSO NORTE/NORDESTE DE EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS E MATEMÁTICA, 7., **Anais....** Dezembro, 2004.

CHAVES, M. I. A.; ESPÍRITO SANTO, A. O. Possibilidades para Modelagem Matemática na sala de aula. In: ALMEIDA, L. M. W.; ARAÚJO, J.; BISOGNIN, E. (Org.) **Práticas de Modelagem Matemática na Educação Matemática**. Londrina: EDUEL, 2011, p. 161-179.

CREASE, R. P.; SCHLESINGER, G. **A Medida do Mundo**. São Paulo: Zahar, 2011.

DEMO, P. **Desafios Modernos da Educação**. 15. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2009.

FERRUZI, E. C. et al. Modelagem Matemática como Estratégia de Ensino e Aprendizagem como Estratégia de Ensino nos Cursos Superiores de Tecnologia. In:

WORLD CONGRESSO ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY, [**Anais...**]. São Paulo, 2004.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SAND, M. **Lições de Físicas**. Porto Alegre: Bookman, 2008. v. 1.

FLICK, U. **Introdução à Pesquisa Qualitativa**. São Paulo: Bookman, 2008.

FONSECA, I. M. A. Erros Experimentais – uma Abordagem Pedagógica. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO DE ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, [Anais....], Aveiro. 2004.

GIL, A. C. **Metodologia do Ensino Superior**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

GOLDEMBERG, J. **Física Geral e Experimental**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1970. v. 1.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2011.

KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. 10. ed. São Paulo: Perspectiva, 2011a.

KUHN, T. S. **A Tensão Essencial - Estudos Seleccionados sobre Tradição e Mudança Científica**. São Paulo: UNESP, 2011b.

MACEDO, H. **Dicionário de Física**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1976.

MARINELLI, F. **Uma Interpretação para as Dificuldades Enfrentadas pelos Estudantes de Física num Laboratório Didático de Física**. 116 f. 2007. Mestrado, USP, São Paulo, 2007.

MATHEUS, R. F. **A Estrutura das Revoluções Científicas**: resumo crítico detalhado. 2005. Disponível em: <[http://www.rfmatheus.com.br/doc /revolucao_cientificav2.3.pdf](http://www.rfmatheus.com.br/doc/revolucao_cientificav2.3.pdf)>. Acesso em: 4 jun. 2014.

MOREIRA, M. A.; GONÇÁLVES, E. N. Laboratório de Física Estruturado e Não Estruturado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 10, n. 2, 1980.

MOREIRA, M. A. **Teoria de Aprendizagens**. 2. ed. São Paulo: E.P.U. 2011.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. Sobre o Ensino do Método Científico. **Caderno Catarinense Ensino de Física**, v. 10, n. 2, 1993.

MORRONE, W. et al. Modelagem Matemática e a Atividade Experimental Como um Modelo de Integração no Ensino de Física. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO ENSINO DE FÍSICA, 17., [**Anais...**] São Luiz, 2007.

PIETROCOLA, M. O Realismo Científico de Mário Bunge e o Ensino de Ciências Através de Modelos. **Investigação em Ensino de Ciências**, Santa Catarina, v. 4, n. 3, p. 213-227, 1999.

RIBEIRO, S. M.; FREITAS, D. S.; MIRANDA, D. E. A Problemática do Ensino de Laboratório de Física na UEFS, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, 1997.

ROSA, C. W. Concepções Teóricas Metodológicas no Laboratório Didático de Física na Universidade de Passo Fundo, **Revista Ensaio**, Florianópolis, v. 5, n 2, 2003.

SANTORO, A. et al. **Estimativas e Erros em Experimentos de Física**. São Paulo: UERJ, 2005.

SILVA NETO, M. J. ; ESPÍRITO SANTO, A. O. ; BRAGA, R. M., Modelagem Matemática no Ensino de Física Experimental. In: CNMEM, 8., [**Anais...**] Santa Maria Rio Grande do Sul, 2013.

SILVA NETO, M. J. et al. “Ensino da Lei de Hook com uso da Modelagem Matemática para Alunos de Engenharia Civil”. In: CNMEM, 9., [**Anais....**] São Paulo, 2015.

SOUZA, E. S. R.; ESPÍRITO SANTO, A. O. A Modelagem Matemática para o Ensino-Aprendizagem de Física. In: ENCONTRO PARAENSE DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA (EPAEM), 4., [**Anais...**] Belém, 2008.

SZCZEPANIK, G. A Concepção de Método Científico para Mario Bunge, **Revista Guairacá**, n. 27, p. 09 – 30, 2011.

TAKIMOTO, E. **História da Física na Sala de Aula**. São Paulo: Livraria da Física, 2009.

TAYLOR, J. R. **Introdução à Análise de Erros**. São Paulo: Bookman, 2012.

THOMAZ, M. F. A Experimentação e a Formação de Professores de Ciências: uma Reflexão. **Caderno Catarinense de Ensino da Física**, Santa Catarina, v. 17, n. 3, p. 360-369, dez. 2000.

VIEIRA, J. G. S.; FERNANDEZ, R. G. A Estrutura das Revoluções Científicas na Economia e a Revolução Keynesiana. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 36, n. 2, 2006.

ZYLBERSZTAJN, A. Revolução Científica e Ciência Normal em Sala de Aula. In: MOREIRA, M. ; AXT, R. **Tópicos em Ensino de Ciências**. Porto Alegre: Sagra, 1991.

WACHILISKI, M. **Metodologia do Ensino de Matemática e Física: Didática e Avaliação**. São Paulo: Ibpex. 2007.

APÊNDICE A – TABELAS ELABORADAS A PARTIR DOS DADOS MEDIDOS PELOS ALUNOS

Tabela A1.1 - Medidas do diâmetro da esfera de aço com Paquímetro

PAQUÍMETRO		
1ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,15	0,03
Operador 2	18,20	0,08
Operador 3	18,10	0,02
Operador 4	18,10	0,02
Operador 5	18,05	0,07
Média	18,12	0,04
2ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,10	0,03
Operador 2	18,15	0,02
Operador 3	18,10	0,03
Operador 4	18,10	0,03
Operador 5	18,15	0,02
Média	18,13	0,03
3ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,15	0,03
Operador 2	18,20	0,07
Operador 3	18,10	0,03
Operador 4	18,05	0,08
Operador 5	18,15	0,02
Média	18,13	0,04
4ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,05	0,02
Operador 2	18,20	0,07
Operador 3	18,20	0,07
Operador 4	18,10	0,03
Operador 5	18,15	0,02
Média	18,13	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados medidos pelos alunos (2013).

Tabela A1.2 - Medidas do diâmetro da esfera de aço com Micrômetro

MICRÔMETRO		
1ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,119	0,001
Operador 2	18,266	0,148
Operador 3	18,080	0,038
Operador 4	18,096	0,022
Operador 5	18,067	0,051
Média	18,118	0,050
2ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,232	0,060
Operador 2	18,227	0,055
Operador 3	18,232	0,060
Operador 4	18,062	0,101
Operador 5	18,217	0,045
Média	18,172	0,074
3ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,171	0,057
Operador 2	18,108	0,006
Operador 3	18,116	0,006
Operador 4	18,177	0,062
Operador 5	18,029	0,085
Média	18,110	0,040
4ª Medição		
	Medidas (mm)	Desvio Absoluto (mm)
Operador 1	18,157	0,071
Operador 2	18,140	0,054
Operador 3	18,040	0,046
Operador 4	18,022	0,064
Operador 5	18,060	0,024
Média	18,086	0,061

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados coletados (2013).

APÊNDICE B - INSTRUMENTOS DE MEDIDAS E OBJETOS UTILIZADOS - ATIVIDADE TEORIA DE ERROS

Fotografia A1 - Paquímetro de aço, marca Mitutoyo, com precisão de 0,05 mm



Fotografia A2 - Micrômetro digital de aço, marca Digimess, com precisão de 0,001 mm



Fotografia A3 - Parafuso e Porca de aço



Fotografia A4 - Esferas de vidro e aço maciço



Fotografia A5 - Acessório de PVC



APÊNDICE C - QUESTIONÁRIOS APLICADOS

A 3.1 – Questionário - M. R. U.

1. O que você entende por movimento?
2. Num corpo que se desloca entre dois pontos, você saberia identificar o que caracteriza esse movimento, por meio de uma ou mais grandezas físicas?
3. Qual a trajetória de um corpo em movimento retilíneo?
4. Qual a diferença entre espaço percorrido e posição?
5. Qual o significado do gráfico $X \times T$?

A 3.2 – Questionário - Lei de Hook

1. A Força F dividida pela elongação X é constante ou variável?
2. Qual a relação matemática entre F e X ?
3. A força F cresce com a distensão X ? Justifique.
4. Qual o significado da curva $F \times X$ obtida pela sua medida?
5. Existe um limite para a força elástica? Ela é infinita?