UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE EDUCAÇÃO

FABIANA BOTELHO KNEUBIL

**O PERCURSO EPISTEMOLÓGICO DOS SABERES
E A
EQUIVALÊNCIA MASSA-ENERGIA**

SÃO PAULO

2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE EDUCAÇÃO

FABIANA BOTELHO KNEUBIL

**O PERCURSO EPISTEMOLÓGICO DOS SABERES
E A
EQUIVALÊNCIA MASSA-ENERGIA**

Tese apresentada à Faculdade de Educação da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Educação.

Área de Concentração: Ensino de Ciências e Matemática
Orientador: Prof. Dr. Maurício Pietrocola

São Paulo
2014

Fabiana Botelho Kneubil

O Percurso Epistemológico dos Saberes e a Equivalência Massa-Energia

Tese apresentada à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Educação.

Área de Concentração: Ensino de Ciências e Matemática

Aprovada em: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora

Prof. Dr. Maurício Pietrocola (FEUSP)
Orientador - Membro Titular

Prof. Dr. Frederico Firmo de S. Cruz (UFSC)
Membro Titular

Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho (UFAL)
Membro Titular

Prof. Dr. André Ferrer P. Martins (UFRN)
Membro Titular

Prof. Dra. Maria Inês Ribas Rodrigues (UFABC)
Membro Titular

Prof. Dra. Anna Maria P. de Carvalho (FEUSP)
Membro Suplente

Prof. Dra. Maria Regina Kawamura (IFUSP)
Membro Suplente

Prof. Dr. Luis Carlos de Menezes (IFUSP)
Membro Suplente

Prof. Manoel Roberto Robilotta (IFUSP)
Membro Suplente

Prof. Dr. Paulo Rogério M. Correia (EACH-USP)
Membro Suplente

*DEDICO A TODOS OS AMIGOS
QUE COMUNGAM DO MESMO IDEAL*

Agradecimentos

Agradeço ao orientador Maurício Pietrocola por me apoiar no desenvolvimento deste trabalho e propiciar discussões muito incentivadoras, que aumentaram ainda mais minha vontade de continuar.

Agradeço ao Ivã Gurgel pelas inúmeras conversas durante este período. Agradeço, principalmente, pela honestidade e clareza presentes em cada uma delas, que me geraram admiração e respeito pelo seu trabalho.

Agradeço ao Mané pela amizade e pelo acompanhamento do meu trabalho, sempre me incentivando e depositando confiança em mim. Agradeço, principalmente, pelas discussões com muita física e filosofia, que me causaram inúmeros *baratos*.

Agradeço ao prof. Elio Carlos Ricardo pelas discussões valiosas no início do meu trabalho.

Agradeço ao amigo Ricardo Karam. Mesmo estando 'longe' durante praticamente todo meu doutorado, nossas conversas pelo skype foram muito importantes, pois me incentivaram muito e abriram possibilidades diferentes, ampliando minha pequena visão de mundo.

Agradeço aos grandes amigos Marcus Vinicius, William Amado e Rosane, pelo convívio estreito, pelas reuniões prazerosíssimas e por todas as conversas de cunho filosófico-espiritual.

Agradeço ao prof. implementador, pela extrema disposição em participar do projeto da minha tese. Sem ele, esta tese não teria saído!

Agradeço a todos os amigos do LaPEF, pelo convívio, pelas reuniões divertidas e produtivas, pelo companheirismo.

Agradeço aos amigos do IFUSP, em especial, à Renata e à Graciella, pela alegria transmitida, pelas conversas e, também, pelos desabafos.

Agradeço aos funcionários da FEUSP. Em especial, ao Marcelo, Antônio, Bruna, Cláudia, Rosana, Moisés e Natalino, pela atenção, gentileza e apoio durante todo o período que estive na pós.

Agradeço à Sociedade Brasileira de Física, pela excelente ideia de levar professores brasileiros ao maior acelerador de partículas do mundo. Agradeço, imensamente, pela oportunidade de conhecer o CERN e ter sentido emoções indescritíveis lá.

Agradeço aos Amigos da Pró-Vida, pelo incentivo e torcida durante toda minha trajetória.

Agradeço à minha família. Meus irmãos, Dani e Gus, pela Amizade Verdadeira. Agradeço aos meus pais, Elzio e Denise, eterna e especialmente! Não tenho palavras para descrever o quanto admiro e amo vocês! Parte do que sou, atribuo às condições que vocês me deram.

Agradeço ao Grande Amigo, Dr. Celso Charuri, por iluminar o Caminho.

Resumo

O ensino da física tem sido alvo de muitas pesquisas nas últimas décadas e o tema da inovação curricular, no cenário brasileiro, é bastante presente. A inserção da física moderna no ensino médio foi tratada por muitos educadores, principalmente no que diz respeito a metodologias e estratégias. Neste trabalho, abordamos a mesma temática, mas com maior ênfase em questões internalistas. Nosso interesse principal consistiu em acompanhar o percurso epistemológico de um tema de física moderna, a equivalência entre massa e energia, desde o âmbito acadêmico erudito até a sala de aula. Partimos de uma revisão do conceito de massa, em três contextos diferentes, o da mecânica clássica, do eletromagnetismo e da relatividade, com a finalidade de mostrar que as propriedades da inércia e da atratibilidade, que na concepção newtoniana são atributos da matéria, passam a ser da energia, na relatividade. Essa revisão resultou em um material escrito sobre o tema, motivado pela percepção que o ensino da fórmula $E = mc^2$ está praticamente ausente dos livros didáticos destinados aos ensinos superior e médio. A partir do nosso texto, desenvolvemos uma sequência didática sobre o conceito de massa, seguindo a metodologia da pesquisa baseada em *design* e, em seguida, implementamos um curso para professores de física do ensino médio, que foi aplicado por um professor implementador, com experiência no ensino superior. Este professor teve acesso ao material escrito antes do *design*, participou de reuniões preparatórias e ajudou a desenvolver um manual de instrução para a implementação do curso. Para compreender o fluxo do conceito de massa em diferentes esferas, utilizamos a *Teoria da Transposição Didática*, de Chevallard. Isto permitiu definir a *Intenção Didática* do curso, que foi decomposta em cinco componentes: matemática, ordenamento, significação, epistemologia e re-significação. Nossa questão de pesquisa está relacionada à atuação do professor que ministrou este curso e à sua apropriação desta intenção didática. Suas aulas foram registradas e analisadas com métodos de pesquisa qualitativa. A análise dos dados mostrou que existe uma correlação entre a dificuldade de manifestação da intenção didática e conteúdos inovadores. À medida que o curso progredia e o conteúdo de física moderna aparecia, a dificuldade do professor em expressar a intenção didática aumentava. Os resultados de nossa pesquisa indicam, também, que estas dificuldades estão diretamente relacionadas à natureza do conhecimento científico e, conseqüentemente, à vivência em epistemologia por parte do professor.

Palavras-chave: massa-energia, transposição didática, sequência didática e epistemologia.

Abstract

A considerable amount of research on Physics Teaching has been performed in the last decades. In Brazil, the insertion of modern Physics in high schools has already been considered by a number of researchers, mostly regarding methodologies and strategies. In this work, we have approached the same subject, but emphasized internalistic matters. Our main interest was to follow the epistemological path of a theme of modern Physics, the mass-energy equivalence, from the scholar realm to the classroom. We began by making a revision of the mass concept in three different frameworks, namely classical mechanics, electromagnetism and relativity, with the purpose of amassing evidence that the properties of inertia and attractibility, which were attributes of matter in Newtonian mechanics, shift to the energy, in relativity. This revision yielded a written material about the theme, motivated by the perception that discussions of the formula $E = m c^2$ are practically absent from textbooks used in both high school and basic courses at university. Our text was used to develop a didactic sequence about the concept of mass, employing the design based research methodology, followed by a course aimed at high school teachers, run by an invited implementer teacher, who had already experience at university. This teacher had access to the text produced before the design, took part in preparatory meetings and helped to develop an instruction manual used in the course. In order to understand the flux of the mass concept along different spheres, we employed Chevallard's *Didactic Transposition Theory*. This allowed the definition of the *Didactic Intention* of the course, which was decomposed into five components: mathematics, ordering, signification, epistemology and re-signification. Our research question is related to the actions performed by the implementer teacher during the course and to his appropriation of the didactic intention. His classes were recorded and analyzed, using methods of qualitative research. The analysis of data has shown that there is a correlation between his difficulties in manifesting the didactic intention and innovative contents. As the course progressed and modern Physics contents appeared, the difficulty the teacher had in manifesting the didactic intention increased. Our results also indicate that these difficulties are directly related with the nature of scientific knowledge and, therefore, associated with the experience teacher had in dealing with epistemology.

Keywords: mass and energy, didactic transposition, didactic sequence and epistemology.

Sumário

Introdução	1
1 O Ensino da Massa-Energia	9
1.1 Motivação	9
1.2 O Percorso dos Saberes até a Sala de Aula	16
1.3 Massa e Energia: Três Contextos	29
1.4 A Re-significação da Massa	45
2 A Pesquisa Baseada em Design	51
2.1 Sequências Didáticas: TLS	55
2.2 Características de uma TLS	59
2.3 A TLS sob a visão da TD	67
2.4 A Nossa TLS e Questões de Pesquisa	71
3 Uma Proposta de TLS - $E = mc^2$ e o Peso da Energia	77
3.1 Planejamento do Curso	77
3.2 Funcionalidade: Meios e Fins	82
3.3 Explicitação das IDs das Aulas	85
3.4 Instâncias do Conteúdo	102
4 Metodologia da Pesquisa e Análise	105
4.1 Coleta de Dados do Curso	108
4.2 Método da Análise	110
4.3 Análise da Aula de Mecânica	118
4.4 Análise da Aula de Eletromagnetismo	130
4.5 Análise da Aula de Relatividade	144

5	O Curso e a ID	161
5.1	A Mistura das Componentes da ID	161
5.2	Conhecimento Didático	169
5.3	A ID na Sala de Aula	171
5.4	O Professor e a Sala de Aula	177
6	Considerações Finais	185
6.1	Não-saber, Saber e Re-saber	185
6.2	Sugestões para um Re-design	187
6.3	Conclusões	188
	Referências Bibliográficas	193

Introdução

O conhecimento científico e a prática diária da comunidade que o constrói são bastante complexos. A ciência, dada a sua natureza dinâmica, sofre transformações constantes ao longo da sua construção e o ensino dessa ciência, conseqüentemente, sente a complexidade desta atividade humana. Há várias décadas, pesquisas em ensino de física tem sido feitas em diferentes linhas e a inovação curricular é um tema recorrente em várias delas. Particularmente no Brasil, esse tema é importante, pois grandes esforços acontecem atualmente, visando uma reestruturação da escola básica e da educação científica neste nível. O termo inovação curricular é bastante amplo e se refere a mudanças significativas em muitos aspectos dos currículos, tais como, projeto pedagógico de curso, introdução de disciplinas, estratégias e métodos de aula, formas de abordar o conteúdo, relação com os saberes, formas de avaliação, orientação de alunos, relação professor-aluno, relação aluno-aluno, relação com a comunidade, etc.

Algumas dessas facetas da inovação curricular podem, em princípio, se relacionar diretamente ao conteúdo específico da física, enquanto disciplina escolar. Nesses casos, uma inovação curricular pode envolver inovação de conteúdo. No cenário brasileiro, em especial, iniciativas de inserir física moderna e contemporânea (FMC) no ensino médio tem ganhado destaque. Desde meados da década de 1980 pesquisadores enfatizam a necessidade de mudanças curriculares que incorporem as alterações nas "visões de mundo" que teorias científicas, como a Relatividade Restrita, Geral e a Mecânica Quântica, promoveram. (TERRAZZAN, 1994; OSTERMANN e MOREIRA 2001; MOREIRA e VALADARES, 1998; GIL et al., 1987; OSTERMANN e CAVALCANTI, 1999). Além disso, os artefatos tecnológicos que surgiram com o conhecimento científico desenvolvido a partir do século XX transformam continuamente a sociedade e, por isso, é preciso haver também uma transformação na escola.

Atualmente, existe um certo consenso da necessidade do ensino de temas modernos de

física na escola básica e as justificativas são baseadas nos avanços tecnológicos que a ciência proporcionou nas últimas décadas. As pesquisas que ocorrem hoje são de caráter mais intervencionista, com propostas de estratégias de ensino de temas modernos. Muitas delas apresentam discussões e resultados acerca de metodologias, sequências didáticas sobre os temas e o papel da formação de professores num contexto de inovação curricular. (BROCKINGTON, 2005; NICOLAU JUNIOR, 2014; LAWALL et al., 2010; PIETROCOLA et al., 2009; SIQUEIRA, 2006).

Em 1996, no Brasil, a Lei de Diretrizes e Bases (LDB) orientou a direção de mudanças da educação básica e, dois anos depois, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) foram publicados para sugerir uma reorientação das práticas educacionais e ampliar os objetivos da escola. Segundo eles, o ensino deveria ser baseado na construção de competências e habilidades (BRASIL, 1999) e, a partir daí, a ênfase em competências passou a ser parte do discurso educacional, fomentando discussões sobre inovação curricular.

Na prática, porém, poucas ações foram efetivamente feitas nesta direção (RICARDO e ZYLBERSZTAJN, 2002). Um dos motivos para a não implementação das propostas dos PCN em sala de aula é a pouca compreensão do que são *competências* e, principalmente, como as aliar ao conteúdo já pré-estabelecido no currículo (PERRENOUD, 1999).

Em particular, existe um grupo de pesquisa na Faculdade de Educação da USP, o NUPIC (Núcleo de Pesquisa em Inovação Curricular¹, fundado em 2002, pelo prof. Maurício Pietrocola.), ao qual esse trabalho de doutorado se vincula, que dentre outras atividades, promove cursos de física moderna e contemporânea para formação de professores da rede pública, utilizando materiais desenvolvidos em pesquisas realizadas pela própria equipe. Essas pesquisas educacionais têm focado no **como** fazer a introdução de FMC no ensino médio, o que representa um grande desafio a ser enfrentado atualmente. Nesse tipo de abordagem, o foco principal não é apenas nos conteúdos de física moderna, mas também nas estratégias de ensino com que eles devem ser apresentados para que seu aprendizado seja satisfatório. A concepção do grupo acerca do que é ensinar física moderna não é baseada numa abordagem meramente operacional, como por exemplo, apresentar a equação $E = mc^2$ e apenas mostrar como substituir valores de "m" e "c" para descobrir a energia relativística de um corpo. Ela também não propõe uma simples troca de conteúdo de física clássica por física moderna mas sim, uma reestruturação do processo didático como um todo e tudo o que ele representa.

¹Site: <http://www.nupic.fe.usp.br>

Isso motiva a discussão de questões de natureza epistemológica e didática relacionadas ao ensino dos conteúdos de física moderna, que transcendem o terreno bem conhecido dos temas de física do currículo tradicional. Uma questão, por exemplo, seria saber se o conhecimento de FMC tem a mesma organização estrutural que o clássico. Uma outra, refere-se à investigação se conteúdos de FMC permitem a construção das mesmas habilidades e competências que os clássicos. Por fim, um aluno de nível secundário tem maturidade intelectual e desenvolvimento cognitivo para essas novas competências?

Paralelamente às questões didático-metodológicas voltadas ao ensino, existem outras, relativas à formação de professores. Para que a inovação curricular possa ser efetiva, os princípios que norteiam uma reforma didática devem ser incorporados na prática dos professores, pois eles são os elementos mais sensíveis no processo e têm um papel fundamental. A implementação de mudanças não é simples. Em particular, a formação de professores representa um grande desafio e deve ser alvo de delicada atenção.

É interessante observar que, a medida que as pesquisas em inserção de FMC foram se ampliando, os resultados advindos delas apontam para a necessidade urgente de se modificar a formação do professor. Face à crise do ensino de ciências, os professores sem terem sido formados apropriadamente para enfrentar as exigências da situação atual, são solicitados a mostrar a importância do estudo de ciências, como foi enfatizado por Fourez (2003).

O processo de ensino como um todo é bastante complexo e amplo, e envolve várias dimensões que estão além do professor. Por isso, o professor não pode ser considerado como o único responsável pelo ensino, mas sim um personagem, relativamente indefeso, que também sofre as influências do processo. Para Chevallard (1991), o professor trabalha no processo de transposição didática do conteúdo e está sujeito a pressões externas à sala de aula e influências do sistema de ensino, tanto quanto qualquer outro sujeito envolvido nessa rede educacional. Talvez, por isso, muitos professores reagem às inovações, pois são influenciados por suas concepções e experiências, inclusive como ex-alunos (PINTÓ, 2005). Diante da variedade de problemas e riscos, além da possibilidade do fracasso, como destaca Davis (2003), os professores são impelidos a trabalhar no interior dos processos de didatização dos conteúdos escolares, a fim de adequá-los aos novos objetivos propostos em instâncias superiores.

Além da falta de preparo dos professores, a escassez de materiais didáticos relacionados aos conteúdos de FMC também é uma questão que gera obstáculos à inovação curricular

(COSTA e SANTOS, 1999; OSTERMANN e CAVALCANTI, 1999; CUSTÓDIO, 1999; BROCKINGTON, 2005; NICOLAU JUNIOR, 2014; LAWALL et al., 2010; PIETROCOLA et al., 2009; SIQUEIRA, 2006). No Brasil, dentre os poucos materiais didáticos existentes sobre temas de física moderna, nota-se a ausência objetivos e intenções didáticas claras para a sua utilização. A tarefa de confeccionar livros-texto e manuais didáticos também faz parte da engrenagem maior da rede educacional, sujeita às influências externas política, econômica e social, que pressionam o sistema de ensino.

O processo de didatização de um conteúdo transforma um conhecimento científico em saber escolar, ou seja, um saber que chega efetivamente à sala de aula. Esse processo confere ao saber escolar um novo estatuto epistemológico que, em algumas situações, tem uma identidade própria e pode ser considerado uma criação didática (ASTOLFI e DEVELAY, 1995). No caso de conteúdos de FMC, devido à pouca experiência e prática de ensino na escola, existe uma lacuna muito grande na criação de saberes escolares acerca destes tópicos.

Meu trabalho de doutorado se situa, neste contexto, **entre** o desejo de inserir física moderna no currículo e as dificuldades encontradas pelo professor na implementação dessas inovações. Muitos temas de física moderna foram desenvolvidos em pesquisas nesta linha, como os trabalhos de Ostermann e Cavalcanti (1999)- tema: Partículas Elementares e Interações Fundamentais, em uma escola de Porto Alegre -, Cavalcante (1999)- tema: Raios Cósmicos -, Siqueira (2006)- tema: Partículas Elementares e Modelo Padrão -, Brockington (2006)- tema: Dualidade onda partícula -, Wellington Sousa - tema: Linhas Espectrais - e Nicolau Junior (2014)- tema: Paradôxo dos Gêmeos, em escolas estaduais da cidade de São Paulo. Neste trabalho, tratamos do **conceito de massa** e da sua mudança de significado devido à relatividade restrita, proposta por Einstein. No desenvolvimento da tese, articulamos tanto os aspectos concernentes a este conteúdo e sua natureza epistemológica, como a confecção de material didático e a formação de professores.

O nosso olhar para a massa foi motivado inicialmente pela famosa expressão $E = mc^2$, que representa a equivalência entre massa e energia. Ela, talvez, seja a mais popular dentre as equações da física e é bastante divulgada em vários ambientes dentro e fora da escola. Ela aparece de uma maneira até um pouco descuidada em *outdoors*, revistas, televisão, camisetas, etc. Na escola básica encontramos $E = mc^2$ apenas de maneira superficial em alguns livros didáticos. Apesar da sua popularidade, os conceitos nela envolvidos são bem pouco conhecidos.

O conceito de massa ou matéria é um dos mais fundamentais na educação básica. Desde o início do ensino da física, a massa é apresentada como um dos conceitos fundadores. Em particular, é dada a ênfase ao fato de que ela pode ser medida diretamente, assim como o tempo e o comprimento. Isso faz com que a análise dimensional das grandezas físicas do universo de um principiante seja feita baseada nas dimensões da massa [$M \rightarrow \text{kg}$], do tempo [$T \rightarrow \text{s}$] e do comprimento [$L \rightarrow \text{m}$].

No contexto da mecânica newtoniana, massa e matéria são tratadas como sinônimos e suas conceituações estão associadas às propriedades fundamentais da **inércia** e **atratibilidade**. Na mecânica clássica, ela também está relacionada com a energia. Embora este conceito seja posterior à época de Newton, ele foi incorporado à mecânica newtoniana e está relacionado à massa, aparecendo nas expressões da *energia cinética* e da *energia potencial*.

Nessas duas relações, a massa está atrelada à energia mas, do ponto de vista ontológico, as duas entidades são diferentes. No começo do século XX, com o surgimento das relatividades restrita e geral, a relação entre a massa e a energia passou por uma transformação muito grande. A mais conhecida delas consiste na relação $E = mc^2$, que expressa a chamada equivalência massa-energia. Na teoria de Einstein, é possível mostrar que, do ponto de vista matemático, a massa e a energia são entidades de natureza diferentes, como discutiremos no texto da tese. Por isso, embora o termo 'equivalência massa-energia' sugira uma *equidade* entre as duas grandezas, a relatividade especial mostrou o contrário.

Um dos desdobramentos da relatividade é que a **inércia** e a **atratibilidade** passaram a ser propriedades da **energia**, e não mais características da matéria. Uma outra mudança é de caráter mais matemático e menos conhecida: a massa independe do referencial e, portanto, é um **invariante relativístico**. Essa afirmação contrasta com a ideia de que a massa varia com a velocidade, como aparece em muitos livros. Por isso, também abordamos esta questão no corpo da tese. A compreensão de natureza ontológica da massa tem consequências importantes na física atual, por estar relacionada com o bóson de Higgs.

A mudança epistemológica e de significado dos conceitos de massa e energia parece não ter chegado aos livros-texto adotados nos cursos de licenciatura em física e, tampouco, à escola básica. Percebe-se uma lacuna grande entre a visão de mundo introduzida pela relatividade restrita no âmbito da ciência e a educação científica. Deste modo, um professor de física, formado em licenciatura, não tem acesso a essa re-significação dos conceitos de massa e energia. Passado mais de um século, discussões sobre as consequências da

relatividade e da equação $E = mc^2$ ainda não fazem parte das esferas do saber escolar que é didatizado. Quando aparece, a famosa fórmula de Einstein é interpretada de uma maneira muito simples e relacionada apenas à conversão numérica de matéria em energia.

A lacuna entre o saber acadêmico e o ensino também está presente no interior da própria universidade. Por isso, ela é relevante num contexto de inovação curricular e desejo de inserção de temas de física moderna no ensino médio. Nesta pesquisa, desenvolvemos uma sequência didática sobre o conceito de massa, mostrando a mudança de significado ocorrida nele em quase três séculos de física, desde Newton a Einstein. Nosso trabalho propõe uma intervenção direcionada a um contexto real, envolvendo uma **nova didatização** do tema e a produção/criação de um material escrito.

O material faz um compromisso entre as especificidades do conteúdo e a forma metodológica com a qual ele foi desenvolvido. Em relação ao conteúdo, para re-significar o conceito de massa, partimos da concepção newtoniana e mostramos as modificações decorrentes do eletromagnetismo e da relatividade. Essa re-significação também passa pela equação $E = mc^2$. Os temas discutidos foram sob vários vieses: epistemológicos, didáticos, conceituais e estruturais. A proximidade com o *fazer-ciência* foi propiciada pela colaboração de um físico de partículas experiente, que pode garantir que a produção deste material tivesse rigor conceitual.

Em relação ao alcance do nosso material, desenvolvemos a sequência didática seguindo a metodologia de pesquisa baseada em *design* (DBR, do inglês *Design Based Research*)-(BROWN, 1992; COLLINS, 1992; RICHEY et al., 2004; DBR-COLLECTIVE, 2003). Essa metodologia sistematiza o desenvolvimento de um material didático, através de etapas sucessivas e encadeadas, e fornece elementos e instrumentos para um aprimoramento do próprio processo. Deste modo, espera-se obter um *produto* que possa ser transferido e utilizado por outros professores. Essa metodologia é relativamente recente na pesquisa em ensino de física e será apresentada em detalhes no capítulo 2 desta tese.

Diante das questões expostas, organizamos esta tese em sete capítulos. No primeiro capítulo, identificamos o problema educacional e as questões relacionadas ao ensino do $E = mc^2$, no caso concreto do curso de licenciatura do Instituto de Física da USP (IFUSP). Entendemos que, existe a necessidade de discorrermos sobre o processo de ensino desse tema, bem como sobre a *Teoria da Transposição Didática*, de Chevallard (1991). Essa teoria nos dá uma visão geral do problema educacional que estamos tratando e o localiza dentro do processo de ensino. Neste mesmo capítulo, o primeiro, apresentamos um estudo

conceitual-epistemológico do conceito de massa, que chamamos de *massa e energia: três contextos* e a maneira com que os professores de física são formados no IFUSP, pois nossa proposta de intervenção acaba atingindo alunos e ex-alunos desse universo. Assim, a seção que discorre sobre a *massa e energia*, do capítulo 1 da tese, serve como padrão de referência para o *design* do material, isto é, ela foi exemplo de como poderia ser o saber didatizado sobre o tema.

Em seguida, no capítulo 2, apresentamos a metodologia da pesquisa baseada em *design* (DBR) e descrevemos em detalhes as etapas do processo e os preceitos dessa metodologia. Caracterizamos, também, as TLS (do inglês *Teaching-Learning Sequences*) e a inserimos dentro do contexto da DBR, como uma forma de produzir material didático relacionado a um tema específico. Além disso, neste mesmo capítulo, inserimos a metodologia do *design* dentro do referencial da transposição didática. Esta junção dos dois referenciais esclarece o contexto de nossa pesquisa e localiza a **questão a ser investigada**, que está relacionada à atuação do professor durante a implementação e à sua apropriação da intenção didática do curso.

No capítulo 3, descrevemos a nossa proposta de TLS sobre o conceito de massa, caracterizando o curso como um todo e, também, cada aula individualmente. Explicitamos, ainda, a intenção didática de cada aula.

A sequência didática desenvolvida foi implementada por um professor convidado, externo ao IFUSP que participou do processo de design. Ela foi dada em quatro sábados seguidos, de 14 de setembro a 05 de outubro de 2013. As aulas foram oferecidas no Instituto de Física da USP, pelo Departamento de Cultura e Extensão e caracterizadas como *Curso de Difusão* para professores de física e ciências. Tivemos a inscrição de 20 professores e, em média, uma participação de 15 professores por aula.

Considerando que as questões de pesquisa estão relacionadas ao professor implementador da nossa sequência didática, a análise está centrada nas aulas que este professor deu. A metodologia de análise é apresentada no capítulo 4. Essa análise está baseada na metodologia de pesquisa *qualitativa* e se caracteriza como um *estudo de caso*, já que o contexto criado para a implementação da sequência didática e a situação a qual o professor implementador foi submetido são únicos. Discorremos, também, no capítulo 4, sobre a implementação da TLS e a coleta de dados para a análise.

A análise das aulas do professor implementador é feita no capítulo 5. Criamos algumas categorias de análise, que chamamos de *componentes da Intenção Didática* (ID), partindo

da ideia das categorias criadas por Karam (2011). Segundo ele, elas dão critérios que possibilitam analisar aulas quanto à sua *qualidade didática*. Nossas componentes são relacionados à natureza do conhecimento científico e às características específicas do curso. Criamos uma tabela que permite localizar as componentes da ID observadas durante o cumprimento das tarefas de cada aula.

Além das aulas gravadas, coletamos outros materiais como fonte de dados. Durante a implementação do curso, aplicamos pequenas perguntas aos alunos em relação aos conteúdos daquele dia. Essas respostas deram indícios complementares sobre o desempenho do professor implementador. Ao final de cada aula, solicitamos ao professor um relato escrito que servirá para análise documental, cruzando as informações com a categorização das aulas.

Por fim, nos dois últimos capítulos, discutimos o resultado de nossa análise a respeito de dois aspectos: (i) o desempenho do professor nas cinco componentes da ID e (ii) fatores gerais que colaboram para a implementação do curso. Fazemos, também, sugestões para um *re-design* e uma reimplementação da sequência didática desenvolvida. Essas sugestões podem ser consideradas como um manual 'preventivo', alertando aos professores das dificuldades didáticas de implementação na abordagem do tema específico. Com esses resultados, acreditamos estar contribuindo para o conhecimento em ensino de física, numa dimensão didática e prática, relacionada ao conceito da massa-energia.

Capítulo 1

O Ensino da Massa-Energia

1.1 Motivação

O ensino de qualquer conceito da física passa, necessariamente, não apenas por ele mesmo, mas também por outros que dão significado a ele. Nesta ciência, os conceitos se relacionam mutuamente e é praticamente impossível ensinar um deles sem se referir a outros. No caso do conceito de massa, a mudança epistemológica sofrida, ao longo de quase três séculos, é refletida numa reestruturação e reorganização das relações entre a massa e outros conceitos, como energia, momento, inércia, campo, etc. Embora já nos meados do fim do século XIX estas relações começassem a se modificar com os fenômenos eletromagnéticos, foi apenas no início do século XX que as mudanças estruturais entre massa e energia foram estabelecidas, formalmente, com a teoria da relatividade restrita. Por isso, o ensino da mudança epistemológica do conceito de massa passa pela discussão da chamada *equivalência massa-energia*, expressa na fórmula $E = mc^2$.

Este trabalho começa com a investigação de como $E = mc^2$ aparece no nível universitário, especificamente nos cursos de licenciatura, já que é lá que se dá a formação de professores que irão atuar em escolas de nível médio. Para tanto, buscamos algumas informações sobre a licenciatura em física do Instituto de Física da USP, campus de São Paulo, observando a grade curricular no manual do curso de licenciatura (IFUSP, 2011). Existem duas disciplinas relacionadas com a relatividade. A primeira delas é uma disciplina obrigatória do 5º semestre, chamada *Relatividade*, com carga horária de 2h por semana e a segunda, é optativa, intitulada *Partículas: a dança da matéria e dos campos*, com 4h semanais. Nas figuras 1.1.1 e 1.1.2, mostramos a grade curricular do manual da licenciatura

das disciplinas do curso diurno, obrigatórias e optativas, respectivamente (IFUSP, 2011, p.6 e 9).

As duas disciplinas destacadas em vermelho abordam vários temas da relatividade restrita. Em princípio, nas ementas existe o espaço para a discussão específica da massa-energia. Apresentamos, em seguida, as ementas extraídas do manual (IFUSP, 2011, p.15 e 19), nas quais os tópicos resumidos relacionados à massa, à energia, ao momento, etc, estão pintados em vermelho.

III. GRADE CURRICULAR DIURNO

1º. SEMESTRE					5º. SEMESTRE				
		aula	Trab	Hora		aula	trab	hora	
4300151	Fundamentos de Mecânica	4	0	4	4300374	Relatividade	2	0	2
4300152	Introdução às Medidas Físicas	4	0	4	4300372	Eletromagnetismo	4	0	4
4300160	Ótica	2	0	2	4300356	Elem. Estrat. Ens. Física	4	0	4
MAT105	Geometria Analítica	4	0	4	4300259	Termo-Estatística	4	0	4
MAT104	Cálculo I para Licenciatura	4	0	4	4300380	Ciência e Cultura	2	6	14
	TOTAL	18	0	18	4300390	Práticas em. Ensino de Física	2	3	8
						TOTAL	18	9	36

2º. SEMESTRE					6º. SEMESTRE				
		aula	trab	hora		aula	trab	hora	
4300153	Mecânica	4	0	4	4300375	Física Moderna I	4	2	8
4300156	Gravitação	2	0	2	4300373	Laboratório de. Eletromagnetismo	4	0	4
4300159	Física do Calor	4	0	4	4300458	Complementos de Mecânica	4	0	4
MAT133	Cálculo II para Licenciatura	4	0	4	4300358	Propostas e Projetos. Ens. Física	4	0	4
EDA463	POEB	4	1	6		TOTAL	16	2	20
	TOTAL	18	1	20					

3º. SEMESTRE					7º. SEMESTRE				
		aula	trab	hora		aula	trab	hora	
4300255	Mec. Corpos. Rígidos Fluidos	4	2	8	4300376	Física Moderna II	4	0	4
4300270	Eleticidade. e Magnetismo I	4	0	2	4300377	Laboratório de. Física Moderna	4	0	4
4300254	Laboratório de Mecânica	2	0	2	EDM425	Metodologia Ensino Física I	4	2	8
MAT208	Cálculo III para Licenciatura	4	0	4		TOTAL	12	2	16
EDFxxx	Psicologia da. Educação* (bloco)	4	1	6					
	TOTAL	18	3	22					

4º. SEMESTRE					8º. SEMESTRE				
		aula	trab	hora		aula	trab	hora	
4300271	Eleticidade. e Magnetismo II	4	2	8	EDM426	Metodologia . Ensino Física II	4	2	8
4300357	Oscilações e Ondas	2	0	2		TOTAL	4	2	8
OFL605	Química Geral	6	0	6					
MAT228	Cálculo IV Licenciatura	4	0	4					
EDM402	Didática	4	1	6					
	TOTAL	20	3	26					

*disciplina optativa do Bloco de Educação (veja quadro na seção IV)

Figura 1.1.1: Disciplinas obrigatórias do curso de licenciatura do IFUSP

4300374 - Relatividade - 5º Semestre

Requisitos: 4300156, 4300153

Carga Hor.: 2 h/semana

Programa: Fenômenos relativísticos: **Energia do elétron com alta velocidade**, alongamento da vida média de uma partícula, efeito Compton, **transformação de massa em energia na desintegração de núcleos**, etc... Princípio de relatividade e invariância da velocidade da luz no vácuo. Transformações de Lorentz. Contração das distâncias,

dilatação do tempo, relatividade da simultaneidade. Composição e transformação das velocidades. Efeito Doppler relativístico. Elementos de dinâmica relativística. **Relação energia-momento linear. Transformação massa energia.** Confronto entre a teoria de Lorentz e a teoria de Einstein. Interpretação dos experimentos de Michelson-Morley, Trouton-Noble, Kaufmann, ... Noções de teoria da Relatividade Geral e confirmações experimentais.

Bloco de Instrumentação para o Ensino de Física			Bloco Integrador		
(Mínimo de 4 créditos)			(Mínimo de 2 créditos)		
4300358	Prop. e. Proj. Ensino. de Física	4	4300353	Tópicos de História da Fis. Clássica	2
4300456	Produção de Material Didático	4	4300405	Evolução dos Conceitos da Física	2
4300459	Tec.Inf.Com.no Ensino Física	4	4300454	Tópicos de História da Fis. Moderna	2
4300461	Tecn. do Ensino de Física I	4	FLF0472	Filosofia da Física	2
			FLF0368	Teor. do Conhec.e Filos. da Ciência	1
			FLH0444	Hist.da Ciênc.Téc. Trab	5+1
Bloco Temático (sugestão)			Bloco Geral (sugestão) ² .		
(Mínimo de 8 créditos)					
ACA0115	Introd. às Ciências Atmosféricas	6	4300204	Física Matemática I	6
AGA0105	Conc. de Astronomia para Lic.	4	4300215	Introd. à Prática da Informática	6
AGA0106	Astronomia de Posição	4	4300216	Práticas Avançadas da Informática	6
AGA0214	Estrut. e Form. Sistema. Solar	4	4300303	Eletromagnetismo I	6
AGA0215	Fund. de Astronomia	4	4300308	Termodinâmica	4
AGA0416	Introd. à Cosmologia	4	4300320	Introdução ao Caos	4
0440620	Geologia Geral	4	4300327	Introdução à Ótica	6
4300266	Partículas: dança da mat/campos	4	4300403	Mecânica Quântica I	4
4300325	Física do Corpo Humano	4	4300423	Introdução à Microscopia Eletrônica	4
4300346	Física da Poluição do Ar	4	4300431	Utiliz. feixes ion. carac. materiais	4
4300351	Física do Meio Ambiente	2	4302360	Ácel.de Partículas: Fund.e Aplicações	4
4300436	Ef. Biol. Rad. Ioniz. e não-Ioniz.	4	MAP0214	Cálc. Numérico c/ Aplic. em Fis.	4
4300463	Física Aplicada	4	MAT0122	Álgebra Linear	4
			MAT0341	História da Matemática I	4
Bloco de Educação			Créditos-trabalho:		
(Mínimo de 8 créditos)					
EDFxxx(Psicologia da Educação- 4 créditos aula +1 crédito trabalho) + qualquer outra disciplina oferecida pela Faculdade. de Educação			4300490	Monografia para Licenciatura	6

Figura 1.1.2: Disciplinas optativas do curso de licenciatura do IFUSP

4300266 - Partículas: a dança da matéria e dos campos - Optativa

Requisitos: 4300255

Carga Hor.: 4 h/semana

Programa: Força e matéria: a Física e suas leis. Natureza: contínua ou discreta?. A

luz e sua natureza. Onda ou Partícula: o mundo do muito pequeno. Simetrias e leis de conservação. Quântica e **Relatividade**. A música do balé: as interações. Invariância de gauge: a grande unificação. Vácuo: a antítese do vazio. Cosmologia: o princípio e o fim.

A grade curricular e as ementas tem o papel de organizar o conteúdo que deve ser cumprido no curso de graduação. Elas são elaboradas, em geral, por uma comissão de curso que procura adequar os conhecimentos científicos mínimos a que um estudante deve ser submetido no nível superior. Embora a grade curricular e a ementa das disciplinas estejam no manual da licenciatura, na prática, muitas vezes, o seu cumprimento não é rígido e depende do docente.

* * *

Outro elemento institucional importante no nível superior é o **livro-texto**. Os livros adotados nos cursos de graduação têm um papel fundamental na formação do estudante. Eles abrangem os conteúdos das ementas e servem de apoio aos docentes que ministram as disciplinas. Em geral, os livros-texto tradicionais são usados repetidamente ao longo dos anos nas universidades e podem, inclusive, orientar a escolha e definir os conteúdos que entrarão nas ementas.

Nos livros-texto comumente usados na graduação do IFUSP, os conceitos de massa, energia e momento da relatividade restrita aparecem de maneira bem sintetizada. Apresentamos, a seguir, um breve resumo da abordagem desse tema em alguns livros.

O livro *Fundamentos da Física*, vol. 4, dos autores *Halliday, Resnick, Walker*, possui 12 capítulos, dentre os quais oito são dedicados aos tópicos de física moderna (HALLIDAY et al., 1993). Para a relatividade, apenas um capítulo do livro, o de número 42. Ele está dividido em 14 seções, sendo que 12 delas abordam a cinemática relativística e apenas duas, a dinâmica relativística. Nessas duas seções, os autores introduzem os conceitos novos de momento linear e energia na relatividade, mostrando as fórmulas. Em seguida, existem dois exemplos de como usá-las em problemas propostos. Toda a abordagem da energia relativística se resume a duas páginas e meia. Nos capítulos 47 e 48, os autores tratam de física nuclear, energia nuclear e processos de fissão e fusão. A fórmula $E = \Delta mc^2$ é citada em apenas uma linha, na página 257, como sendo energia de ligação nuclear. Nesses dois capítulos, essa fórmula é usada apenas nos exemplos de exercícios resolvidos em aplicação na radioatividade.

O livro-texto de Moysés Nussenzveig, chamado *Curso de Física Básica*, vol.4, possui 10 capítulos, sendo um deles, o de número 6, intitulado Introdução à Relatividade (NUSSENZVEIG, 1998). Nele existem três seções para dinâmica relativística, abordando momento, energia e a inércia da energia. Essas seções ocupam 12 páginas do livro e o autor apresenta os conceitos de maneira matemática, deduzindo todas as fórmulas que relacionam energia, massa, momento, força, usando composição de velocidades e os fatores γ e β das transformações de Lorentz. Suas deduções envolvem poucos comentários explicativos e, após apresentar na seção 6.9, a expressão do momento relativístico

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ,$$

relacionando-o com a massa de repouso, afirma que '*a característica da inércia da partícula que tem um significado invariante é a sua massa própria m_0* ' (idem, p.212). Nas duas seções seguintes, dedicadas à energia relativística e à inércia, o autor apresenta a famosa fórmula de Einstein através de uma dedução com um experimento de emissão de energia de uma caixa com dois corpos. Um corpo A emite e o outro corpo B absorve, sofrendo uma variação no seu momento. Ao final, ele comenta que '*qualquer forma de energia tem inércia, e a massa inercial m associada à energia E é dada pela célebre relação de Einstein $E = mc^2$, o que é um dos resultados mais importantes da teoria da relatividade restrita*' (idem, p.218).

Um livro também usado no IFUSP é o *Curso de Física de Berkeley* (KITTEL et al., 1973). Tópicos relacionados à relatividade restrita aparecem no volume 1, de Mecânica. O livro tem 15 capítulos, dos quais dois são dedicados à relatividade: os capítulos 11 e 12. Entretanto, no capítulo anterior, o de número 10, os autores iniciam uma discussão sobre a *luz* e, neste trecho, apresentam a invariância de c como resultado da experiência de Michelson-Morley. Além disso, ainda neste capítulo que antecede a relatividade, o livro discute, sucintamente, o conceito de *velocidade limite* no experimento de aceleração de elétrons. Eles afirmam que o resultado do experimento é que essas partículas não podem chegar a velocidades maiores que c e mostram o gráfico da figura 1.1.3.

Os autores resumem o resultado do experimento e afirmam que '*em altas velocidades, v^2 não é proporcional à energia cinética, podemos esperar que a **massa inercial** varie com a velocidade*' (KITTEL et al., 1973, p.323, grifo nosso).

Figura 1.1.3: Figura tirada do livro "Curso de Física de Berkeley", vol.1, pág 322. (os textos 'previsão clássica' e 'previsão experimental' foram adicionados por nós).

Estes resultados anunciam no livro o início da relatividade, que é apresentada nos dois capítulos seguintes. O primeiro é dedicado à cinemática relativística e, o segundo, é o que nos interessa, pois os autores apresentam os conceitos de momento e energia e toda a discussão é baseada no formalismo matemático. No desenvolvimento do tema, eles afirmam que *'uma vez que a massa de repouso é constante, sabemos que $M^2 c^4$ também o é sendo portanto um invariante de Lorentz como deve ser'* (KITTEL et al., 1973, p.368, grifo nosso). Os nossos grifos nas citações tem a intenção de ressaltar o uso dos conceitos de massa inercial e massa de repouso, sem maiores discussões acerca das importantes diferenças entre elas.

Um outro livro usado no IFUSP, num nível mais avançado, é o *Mecânica* de Keith Symon, com 14 capítulos, dois dos quais se referem à relatividade: um para os postulados básicos da teoria e outro, para a dinâmica relativística (SYMOM, 1982). O primeiro deles, de número 13, trata da cinemática relativística, começando pelos postulados básicos, mudança de referencial e velocidade da luz. A seguir, são deduzidas a dilatação do tempo, a contração do espaço, as transformações de Lorentz e dados alguns exemplos de aplicações. O segundo capítulo, de número 14, trata da dinâmica relativística de maneira bastante técnica, com o uso de álgebra vetorial, matrizes e tensores. Os conceitos de massa, de energia e de momento são introduzidos posteriormente, de maneira matematizada. A se-

guir, o autor já parte para teoria de colisões e as equações relativísticas do movimento, usando $E = mc^2$ de forma técnica, sem a preocupação de uma explicação de significados e do conteúdo.

Por fim, mencionamos o livro *Teoria da Relatividade Especial e Geral* (EINSTEIN, 1999), escrito pelo próprio Einstein, que tem uma linguagem acessível aos alunos de graduação. O livro é dedicado quase que totalmente à explicação dos conceitos da relatividade restrita e geral de forma qualitativa, por isso, não apresenta muitas fórmulas. Einstein aborda o assunto energia relativística e a fórmula $E = mc^2$ como resultado geral da teoria e, das páginas 41 a 44, discute o aumento da energia e da **massa inercial** com o aumento da velocidade.

* * *

Na universidade, o professor é especialmente importante, pois ele tem liberdade intelectual e autonomia em ministrar as suas aulas. A realização dos cursos de graduação é alicerçada na interação do **professor** com a **ementa** e com o **livro-texto**. A relação entre eles é circular e, do ponto de vista hierárquico, no que se refere ao ensino, seus papéis se confundem, pois não há uma regra única que estabelece como deve ser cumprida a ementa.

Figura 1.1.4: Circularidade entre professor, ementa e livro-texto

Por exemplo, um docente recém contratado no IFUSP pode querer ministrar a disciplina "Física 3", que está no 4º semestre na grade curricular. Entretanto, dada a sua inexperiência, provavelmente, irá buscar na ementa do manual do bacharelado quais os conteúdos de eletromagnetismo que deverão ser abordados e adotar um livro-texto tradicional. Neste caso, as aulas deste docente iniciante serão bastante próximas do livro-texto e da lista de conteúdos da ementa. Assim, fica difícil distinguir se uma aula sobre um tema, como '*campo de uma distribuição esférica de carga*', foi dada porque estava na ementa ou porque estava no livro-texto ou porque o professor achou que ela era importante.

Um professor mais experiente, após dar a disciplina "Física 3" vários semestres seguidos, pode, por outro lado, achar que os livros-texto disponíveis são insuficientes e não devem

ser única fonte de conhecimento. Na universidade, esse professor tem a liberdade de, se quiser, escrever um material próprio, como uma apostila de apoio ao curso. Nesta situação, ele pode abandonar o livro-texto e incluir na sua disciplina o conteúdo que julgar ser mais importante. Por isso, não raras vezes percebermos que, antes de um aluno se matricular em uma disciplina, ele deseja saber quem será o professor que a ministrará, pois cada disciplina 'tem a cara do professor' e o curso acaba sendo um *curso autoral*¹. Esse curso, dado por um professor mais experiente, também se conforma às regras tácitas da universidade e os papéis dos três elementos professor/ementa/livro-texto se confundem. Essa liberdade na prática docente observada no ensino superior não chega à escola básica. As regras que regem a prática de um professor do nível secundário são completamente diferentes. Em minha experiência pessoal de 15 anos lecionando no ensino médio, pude perceber que muitas escolas de elite da cidade de São Paulo planejam seus conteúdos com base nos vestibulares mais importantes. Além disso, o professor não possui liberdade no cumprimento dos conteúdos e baseia suas aulas no livro didático adotado **pela escola**. Seu papel, nesse caso, é bem demarcado e se restringe a um executor do planejamento de aulas que lhe foi imposto e, do qual muitas vezes, não participou.

* * *

Observamos no IFUSP, que existem três versões, relativamente autônomas, do conteúdo que estamos interessados, a relação massa-energia. Isto é, podemos encontrar na instituição: o $E = mc^2$ que está na ementa, o $E = mc^2$ que o professor sabe e o $E = mc^2$ que está no livro-texto. Naturalmente, o $E = mc^2$ em cada instância é estruturado de uma forma diferente. Para entender como conteúdos se manifestam nestas diferentes esferas, discutimos na próxima seção um referencial analítico que nos permite descrever o percurso de um *saber*, no interior do sistema de ensino. Este referencial tem um papel instrumental neste trabalho, pois nos utilizamos de alguns dos seus conceitos para descrever o fenômeno de ensino da massa e da energia.

1.2 O Percurso dos Saberes até a Sala de Aula

O conhecimento da relação massa-energia é usado corriqueiramente no ambiente acadêmico e, como vimos na seção anterior, ele mal chega à sala de aula no nível da graduação. As

¹Esse termo foi usado pelo prof. Ivã Gurgel do IFUSP para se referir a esse fenômeno didático-institucional.

áreas da pesquisa que envolvem partículas elementares e física nuclear se utilizam da teoria da relatividade e da equivalência massa-energia. Entretanto, a maneira como cada área faz uso deste saber varia de acordo com seus interesses e, especialmente, com sua *práxis*. Assim, por exemplo no IFUSP, podemos encontrar $E = mc^2$ no Pelletron, onde os físicos usam este conceito de maneira técnica nas suas atividades experimentais. Encontramos, também, este saber nas discussões do grupo de físicos teóricos e, neste caso, $E = mc^2$ aparece de uma forma diferente. Temos, ainda, outras áreas de pesquisa do IFUSP que podem não precisar usar a relação massa-energia, tais como os laboratórios de estrutura da matéria, de matéria condensada, de cristalografia ou de nanotecnologia. Com estes exemplos, podemos perceber que o comparecimento deste saber não é uniforme dentro da universidade.

Um referencial útil que permite contrastar o conhecimento de $E = mc^2$ dos cientistas com o da sala de aula é a *Teoria da Transposição Didática*, proposta por Chevallard (1991). Segundo ele, o ensino de um saber ocorre em três níveis diferentes, os quais ele chama de *saber sábio*, *saber a ensinar* e *saber ensinado*. No primeiro nível, o *saber sábio* diz respeito ao conhecimento original, que é construído pela comunidade de cientistas e apenas se torna público após sua divulgação em artigos e revistas científicas. Normalmente, este saber não chega à sala de aula, pois possui uma linguagem restrita à comunidade que o produz. No entanto, há a necessidade de uma primeira transformação deste conhecimento original, que leva a um segundo nível de saber, chamado *saber a ensinar*. A esta primeira transformação do saber, Chevallard chama de *transposição didática externa*. Esta consiste basicamente em adaptar o conteúdo do *saber sábio* aos livros e manuais didáticos, de maneira a torná-lo acessível. Por exemplo, se algum aluno do ensino médio, ou mesmo numa graduação em Física, quiser aprender a Teoria da Relatividade, não irá buscá-la nos artigos originais de Einstein, pois é preciso uma adequação de linguagem para que aquelas ideias possam ser entendidas.

A segunda transformação do saber se dá dentro da sala de aula com presença do professor. Ele se utiliza do conhecimento dos livros didáticos e adéqua ainda mais os conteúdos para ordenar e sequenciar as suas aulas. Esta etapa é pessoal e susceptível a algumas variáveis, tais como: o ambiente de sala de aula, a escola, nível de interesse da turma de alunos daquele ano e outras, dependentes de situações específicas. Esta etapa de transformação, do *saber a ensinar* em *saber ensinado*, é chamada de *transposição didática interna*, pois acontece no interior da sala de aula. Os dois processos de transposição estão

representados no esquema abaixo.

As etapas (1) e (2) indicam, respectivamente, a transposição externa, onde aparecem os livros didáticos e a interna, onde aparece o professor, que transforma, na sala de aula, o saber dos livros didáticos. Chevallard ressalta que o ato de preparar uma aula "é, sem dúvida, trabalhar com a transposição didática (ou melhor, na transposição didática)" (CHEVALLARD, 1991, p.20). Isto é, o professor não faz a transposição, ele trabalha nela, na medida em que a transposição didática já havia começado anteriormente.

Chevallard considera que, no processo de ensino, existem três protagonistas principais da relação didática: o professor (P), o aluno (A) e o saber (S). As ligações entre os três elementos se dão pelas dimensões cognitiva (entre A e S), epistemológica (entre P e S) e sociológica (entre P e A), representadas na figura 1.2.1.

Figura 1.2.1: Relação ternária da didática

Cada uma destas ligações são objetos de análise e pesquisa e outros autores se preocuparam em descrevê-las. Por exemplo, alguns elementos da relação entre professor-aluno (PA) podem ser compreendidos pela leitura de Brousseau (1986), em sua teoria do chamado *contrato didático*, que descreve a relação didática como sendo constituída por um conjunto de regras e comportamentos, que determinam implícita e explicitamente o que cada participante (professor e aluno) deverá fazer e do que deve prestar conta. Na dimensão cognitiva, que trata da relação entre o aluno e o saber, a teoria de Vergnaud afirma que o conhecimento está organizado em *campos conceituais*, com domínios que variam ao longo do tempo, através de experiência, maturidade e aprendizagem do sujeito (MOREIRA, 2002). Astolfi também analisa essa dimensão cognitiva sob a perspectiva dos *Obstáculos Epistemológicos* (Bachelard) e Obstáculos à Aprendizagem. Segundo ele, existe um conflito

cognitivo entre as representações dos alunos (concepções alternativas) e os conhecimentos científicos que a escola pretende ensinar (ASTOLFI, 1988).

Além dos três elementos mostrados na figura 1.2.1, a transformação do saber é influenciada por elementos institucionais, econômicos e políticos de um dado ambiente social. Chevallard denominou o entorno do sistema didático de *noosfera*. Segundo ele, "a *noosfera* é a região onde se pensa o funcionamento didático" (CHEVALLARD, 1991, p.28) e, alguns elementos da noosfera, tais como professores, pais de alunos, diretores de instituições de ensino, órgãos políticos, etc, participam ativamente do processo. No caso do Brasil, os PCN sugerem uma estratégia de ensino por competências e habilidades e, portanto, podem ser considerados como parte da noosfera.

A transposição didática de Chevallard descreve o percurso dos saberes e fornece ferramentas importantes para análise. Entretanto, existem muitas críticas a esta teoria, principalmente, em relação ao processo de didatização de saberes de ciências que não tem um saber único de referência. Caillot (1996, apud RICARDO, 2012, p.107) aponta que não são apenas os saberes vindos de um *saber sábio* que entram no processo de ensino. Para entender de maneira mais ampla esta questão, Caillot analisa os saberes do ponto de vista da sociologia dos currículos e não apenas do saber produzido pelas comunidades científicas. De fato, a teoria da transposição didática desenvolvida por Chevallard surgiu na área da matemática e pode ser aplicada às ciências exatas, que possuem um saber de referência facilmente identificável, o que se assemelha à noção de *paradigma*, introduzida por Kuhn (1962). Uma das principais críticas à TD é o fato de ela não poder ser aplicada às ciências humanas.

Por isso, pensando em abranger outras áreas do conhecimento como as ciências humanas, Chevallard ampliou sua teoria para a chamada *Teoria Antropológica da Didática* (TAD), que abrange todas as atividades humanas e suas respectivas instituições sob uma perspectiva praxeológica (CHEVALLARD, 1999). A TAD descreve num modelo único todas as atividades humanas, tomando como base dois blocos que definem a teoria e a prática. O primeiro bloco, o **logos**, refere-se ao **saber** (tecnologia θ e teoria Θ) e o segundo, a **práxis**, refere-se ao **saber-fazer** (tarefa T e técnica τ).

Esses dois blocos formam o que Chevallard chama de *Organização Praxeológica* (OP) e representam o aspecto estrutural da TAD. Além desses blocos, a TAD também envolve o aspecto funcional, representado por seis *Momentos Didáticos* (MD), que se referem ao *es-*

tudo². É possível esquematizar a Teoria Antropológica da Didática, analisando as palavras *Antropológica* e *Didática* como geradoras de dois eixos, como mostramos na figura 1.2.2. Cada organização praxeológica é formada pelo conjunto dos quatro elementos (teoria Θ , tecnologia θ , técnica τ e tarefa T) que definem a atividade de um grupo de pessoas.

Figura 1.2.2: Organização dos elementos da TAD

* * *

• A Relação entre a TD e a TAD

Embora Chevallard não tenha feito a relação entre as duas teorias, podemos juntá-las e pensar as três esferas do saber da TD, de um ponto de vista praxeológico. Na análise do ensino de ciências sob o referencial da TD, o saber que chega à sala de aula passa pelas transposições externa e interna e, as três dimensões diferentes deste saber são sustentadas por, pelo menos, três grupos sociais diferentes (ALVES PINHO, 2000). Estes três grupos sociais compartilham da mesma rotina e comungam das mesmas organizações praxeológicas, definindo o que Chevallard chama de *Instituição*. Podemos dizer, então, que cada saber da TD tem uma praxeologia própria. Juntando o esquema da TD com o da TAD, mostramos na figura 1.2.3 que cada esfera do saber da TD tem uma *instituição* associada.

²Para Chevallard (apud DIOGO et al., 2007), o estudo se refere à "ideia de fazer qualquer coisa com o fim de aprender qualquer coisa (saber) ou de aprender a fazer qualquer coisa (saber-fazer)".

Figura 1.2.3: Relação entre a TD e a TAD

No nível do saber sábio, existem grupos de pessoas que compartilham das mesmas tarefas, das mesmas técnicas, das mesmas tecnologias e das mesmas teorias no seu dia a dia (no esquema, pertencem à OP1). Eles trabalham para produzir e manter o conhecimento científico, com objetivos comuns e, por isso, pertencem à mesma instituição praxeológica, como por exemplo, pesquisadores de uma mesma área. No caso da física, os pesquisadores do LHC (*Large Hadron Collider*) comungam de uma rotina similar, pois realizam tarefas semelhantes, usando as mesmas técnicas, tecnologia e teoria. Um outro físico praticante da área de cristalografia, pertence a outra instituição, no sentido de Chevallard. Com isso, a existência de diferentes conhecimentos e usos do $E = mc^2$ no IFUSP fica mais bem entendida com a TAD.

O segundo nível do saber, o saber a ensinar, é gerado por um grupo de pessoas que confeccionam os livros didáticos e elaboram os programas. Os quatro elementos das organizações praxeológicas (OP2) que estão presentes no cotidiano destas pessoas, são completamente diferentes dos mencionados no caso do saber sábio. Neste nível, os autores de livros e os próprios manuais didáticos constituem instituições. Os professores aparecem na última dimensão do saber, no grupo de pessoas que sustentam a atividade em sala de aula (no esquema, pertencem à OP3).

A definição de instituição, segundo Chevallard, está relacionada com a atividade que uma pessoa realiza e com o conjunto de tarefas e técnicas que ela emprega e não à pessoa em si. Portanto, uma mesma pessoa pode fazer parte de duas ou mais instituições. Por exemplo, um pesquisador da área de física desenvolve um conhecimento que se caracteriza como saber sábio, mas ele próprio também pode escrever livros didáticos, transpondo o saber para a dimensão do saber a ensinar. Assim, ele pertence às instituições de pesquisadores e de autores de livros didáticos.

Na teoria da Transposição Didática, os objetos principais de Chevallard são o saber,

o aluno e o professor, enquanto que na Teoria Antropológica da Didática, o objeto é a atividade humana regular. Estas atividades são pensadas como resultado de saberes aplicados, que podem ser o *sábio*, o *a ensinar* ou o *ensinado*, inseridos em diferentes tarefas, técnicas, tecnologias e teorias. A composição das duas teorias de Chevallard pode ser um ponto de partida adequado à discussão da confecção de currículos, já que as pessoas que realizam esta atividade são consideradas *instituições*, que transitam **entre** OP1 e OP2.

* * *

Na transposição de conteúdos, proposta por Chevallard, existem alguns aspectos que precisam ser articulados. Um deles, por exemplo, diz respeito aos professores. Em geral, eles se utilizam dos livros didáticos para ministrar suas aulas no Ensino Médio e os saberes contidos neste material já sofreram uma transposição. Como ele pode praticar a vigilância epistemológica se ele não tem acesso ao saber sábio? Outro aspecto está relacionado à transposição didática externa, que diz respeito às duas vertentes do ensino que a transposição externa pode ter: os livros-texto do Ensino Médio e os livros universitários. Considerando que os seus conteúdos são diferentes, qual a origem do saber a ensinar em cada um desses níveis? Na figura 1.2.4, mostramos as duas dimensões de ensino em que a transposição didática ocorre. A caixa pontilhada foi inserida como um 'saber escolar', que representa um conteúdo destinado ao ensino médio.

Figura 1.2.4: Diferentes dimensões da TD

Neste esquema, a primeira linha corresponde à dimensão universitária e é semelhante à figura da Transposição Didática de Chevallard apresentada anteriormente. A segunda, corresponde à dimensão do nível secundário, onde o saber original que desencadeia o processo de transposição aos livros didáticos do ensino médio é um *saber escolar*, que é considerado por Pietrocola (2008) como sendo um novo saber, advindo de uma simplificação gerada pela

transposição, que lhe confere um novo estatuto epistemológico (ASTOLFI e DEVELAY, 1995).

Uma hipótese alternativa é que os conteúdos do *saber escolar*, que estão na sala de aula, sejam apenas simplificações dos conteúdos didáticos de livros universitários. Neste caso, o saber sábio original não gera os saberes que irão para o nível secundário. Por isso, no esquema da figura 1.2.5, a seta (a) está em posição diferente. Uma outra possibilidade, mais simplificada ainda, seria a indicada na mesma figura pela seta (b), onde o saber a ensinar do nível secundário vem direto do saber a ensinar do nível universitário.

Figura 1.2.5: Diferentes origens do 'saber escolar'

Esta maneira de ver a transposição didática nos dois eixos de ensino mantém viva a discussão da origem do *saber escolar*. O seu nascimento não é claro na teoria de Chevallard e, por isso, alguns autores discutem os currículos que irão gerar as disciplinas escolares. O debate principal gira em torno do questionamento sobre quais conhecimentos devem ser incluídos no currículo da escola. A legitimação do conhecimento, segundo Lopes e Macedo (2011), é feita sob algumas perspectivas³ e geram saberes validados socialmente. Elas afirmam que

um saber curricularizado ou conhecimento escolar ou ainda discurso pedagógico é um conteúdo produzido para fins pedagógicos, sejam eles em uma instituição com finalidades específicas para tal - a escola - ou em qualquer processo de produção e reprodução cultural. Entender a organização curricular é, assim, entender a organização do conhecimento mediado pedagogicamente (idem, 2011, p.94).

Paralelamente, Develay (1995) considera que o conhecimento escolar não tem sua origem apenas no conhecimento científico, no sentido do *saber sábio*. Nessa linha, o próprio Chevallard afirma que algumas escolhas são feitas a partir do conhecimento científico, mas

³Lopes e Macedo (2011) analisam o conhecimento sob as perspectivas acadêmica, instrumental, progressivista e crítica. Elas ainda alertam que as discussões sobre currículos não se encerram nestas quatro perspectivas e que cada abordagem engloba a discussão de muitos outros enfoques.

são saberes modificados que irão compor os currículos e podem, muitas vezes, constituir *criações didáticas* (CHEVALLARD, 1991, p.45). Já Ricardo (2012, p.117), comenta que as '*criações didáticas são aqueles conteúdos que se reduziram a exercícios com alto grau de operacionalização, mas que não exploram nenhum conceito físico aprendido.*' Assim, os saberes escolares possuiriam **outro** saber de referência e seriam regidos por alguns fatores e contextos sociais, que Martinand (2003) chama de *práticas sociais de referência*. Com estes aspectos levantados pelos autores mencionados, é possível entender que as questões sobre a origem do saber que chega à escola estão localizadas na *noosfera* da TD.

* * *

• O Entorno da TD

As três esferas que Chevallard convencionou têm um caráter sociológico e distingue o *saber ensinado*, que está em sala de aula, o *saber a ensinar*, que está presente nos livros e manuais didáticos e o *saber sábio*, consolidado e validado pela comunidade científica. Chevallard, ao descrever o saber sábio, se preocupa apenas com os saberes científicos que efetivamente fazem parte do processo de ensino, ou seja, aqueles que são didatizados e não se preocupa com a descrição de conhecimentos da física em construção. A esfera do saber sábio de Chevallard é bastante reduzida em relação aos saberes existentes no meio científico, pois apenas alguns deles escolhidos para serem ensinados que sofrem a transposição. Para entender o processo de construção da ciência, uma análise epistemológica é necessária.

No caso do ensino da relatividade nos programas de graduação, apenas alguns tópicos importantes são escolhidos para serem ensinados, como por exemplo, os dois princípios básicos, transformações de Lorentz, características do espaço-tempo e energia. Podemos dizer que estes tópicos que chegam à sala são tudo da teoria da relatividade? Obviamente que não. Alguns temas são escolhidos para serem ensinados e outros, não são. O conhecimento sobre a teoria da relatividade disponível no meio acadêmico é, hoje, muito maior que o que Chevallard chama de *saber sábio*. A concepção dele é restritiva, pois engloba apenas conteúdos que servem de ponto de partida do processo de didatização. No ambiente acadêmico, é possível distinguir duas outras instâncias anteriores ao saber sábio: uma delas refere-se ao conhecimento em construção e a outra, ao conhecimento já consolidado, que não são alvos de didatização. O esquema da figura 1.2.6 ilustra essa ideia.

A esfera A compreende o conhecimento que está na fronteira da ciência, sendo desenvolvido. Muitos cientistas, por exemplo, estão atualmente em laboratórios testando

modelos teóricos a procura de confirmação experimental de teorias em construção. Por exemplo, temos o caso da detecção do famoso bóson de Higgs e os testes da SUSY (super simetria), da massa dos neutrinos, da energia escura, entre outras. Paralelamente, outros conhecimentos já estão consolidados há décadas e não fazem parte mais da fronteira da física. Estes pertencem à esfera B da figura, como, por exemplo, os supercondutores, a nanotecnologia, o spin, a equação de Schröedinger, cosmologia e relatividade geral, entre outros. Esse tipo de conhecimento não costuma ser alvo de didatização e, portanto, não pertencem ao saber sábio, de onde se inicia a transposição.

Figura 1.2.6: Esferas anteriores à Transposição Didática

Esta proposta de organização dos conhecimentos no interior da ciência complementa a descrição do processo de ensino. A ideia de ampliação da TD, engloba o processo não didático da construção do conhecimento científico.

Figura 1.2.7: Elementos da Noosfera

Na figura 1.2.7, mostramos o esquema da TD com o seu entorno. Ele inclui as duas esferas que precedem o saber sábio e, também, os elementos da *noosfera*, que influenciam o processo didático. As duas primeiras esferas se referem ao domínio da pesquisa em Física

e são menos presentes nas discussões educacionais. Já as outras três seguintes, tratam da relação do conhecimento com o processo de Educação.

* * *

• A Árvore dos Saberes

Considerando que os saberes fazem um percurso epistemológico e didático desde a sua origem nos centros de pesquisa e universidades até a sala de aula, podemos comparar este processo com o crescimento e manutenção de uma árvore. Uma árvore é constituída de muitos elementos, como tronco, folhas, fruto, raiz, galhos, seiva, etc... O crescimento de uma árvore se inicia com uma semente jogada ao solo. Durante um tempo, sem aparecer nenhum indício que existe algo naquele chão, aquela semente começa a crescer internamente ao solo e, somente sob condições favoráveis de temperatura, umidade, luz solar, nutrientes,... irá ultrapassar o limite subterrâneo e tornar-se visível: um broto! Sendo influenciado pelos mesmos fatores do ambiente externo, pelo clima e pelas condições do terreno, este broto poderá crescer, transformando-se e adquirindo um corpo muito maior. Nascerão, então, o tronco, os galhos, as folhas e, no caso de uma macieira, por exemplo, também dará frutos, deliciosas maçãs.

O processo de transformação que tornou aquela semente numa árvore e, posteriormente em frutos, é bastante complexo e possui muitas etapas, das quais algumas são visíveis e outras não. Antes do pequeno broto se mostrar ao meio externo, dentro da terra acontecem processos. Muitos processos... quem seria capaz de descrever a fisiologia do crescimento de uma árvore com precisão? Existe um mundo no interior do solo e, o broto somente aparecerá depois destes processos e ultrapassar a barreira do solo.

Analogamente ao crescimento de uma árvore, o percurso de um saber até a sala de aula se constitui de muitas etapas e ações executadas por inúmeros agentes, resultando num "produto final", o fruto, que o aluno experimenta. Em geral, o aluno prova o fruto sem saber de onde ele veio. O bom professor pode, ainda, transformar o fruto em algo bem mais saboroso, uma deliciosa torta de maçã!

Entre a semente e a torta de maçã existe um universo influenciado por muitos agentes, elementos de uma *noosfera*. Uma pessoa sem conhecimento da natureza poderia pensar que a árvore é apenas a sua parte visível. Porém, nenhuma árvore pode começar do chão. Na figura da árvore apresentada, a linha do chão é a fronteira entre o visível e o não-visível.

No caso do nosso problema, esta linha corresponde à separação entre os mundos acadêmico e didático. É a partir desta linha que começa a transposição didática dos saberes, descrita por Chevallard. O saber sábio, em particular, existe no entorno desta linha.

Figura 1.2.8: A árvore dos saberes

Existe uma continuidade, bastante complexa, entre a raiz e a torta de maçã. Analogamente, também existe uma continuidade, bastante complexa, entre o conhecimento dos cientistas e o saber ensinado. Esta continuidade no percurso do conhecimento é descrita apropriadamente por dois conceitos da TD, que apresentamos em seguida.

* * *

• A Intenção Didática e a Vigilância Epistemológica

Neste trabalho, estamos particularmente interessados em dois aspectos do processo de ensino da teoria de Chevallard: a *intenção didática* e a *vigilância epistemológica*. Em princípio, a transposição dos saberes deveria ser carregada de uma *intenção didática* (ID), sem a qual os objetivos do ensino não se tornam claros. Na transformação de um saber

em conteúdo a ser ensinado, a abordagem empregada a ele varia conforme a intenção didática. Assim, um mesmo saber pode ser didatizado e transposto, nas duas esferas da TD, sob várias perspectivas, isto é, ter diferentes facetas. Por exemplo, é possível ensinar o conceito de **campo elétrico** sob vários enfoques, tais como histórico, conceitual, matemático, experimental e, ainda, epistemológico. O conceito de campo existe nas três esferas do saber, entretanto, a forma com que ele se manifesta em cada uma delas é regida pela *intenção didática* do ensino. Esta intenção orienta o processo de transposição, a partir do saber sábio até a sala de aula.

Além da ID, consideramos um outro conceito importante, que Chevallard chama de *vigilância epistemológica* (VE). Esta é uma ação relacionada à consciência, por parte do professor, do objeto de ensino e do processo pelo qual os saberes passam até chegar à sala de aula. Para Chevallard, cabe ao professor “*tomar distância, interrogar as evidências, por em questão as ideias simples, desprender-se da familiaridade enganosa de seu objeto*” (CHEVALLARD, 1991, p.16). A prática da *vigilância epistemológica* permite, entre outras coisas, uma verificação contínua da *intenção didática*, isto é, aferir se o que se ensina está de acordo com os objetivos traçados. É somente com a compreensão e vigilância do processo, que o professor pode ter controle do ensino, garantindo a sobrevivência dos saberes no contexto da sala de aula. A vigilância epistemológica é uma atitude individual que possibilita ao professor refazer o percurso do saber e verificar a pertinência e validade do ensino, não apenas reconhecendo o percurso de didatização dos saberes escolares, como também identificando as implicações didáticas das escolhas feitas (RICARDO, 2012, p.172).

De uma maneira esquemática, representamos os dois conceitos da TD na figura 1.2.9. A intenção didática norteia o processo de transposição e a vigilância epistemológica permite ao professor transitar entre os saberes.

Figura 1.2.9: A ID e a VE

O fluxo da ID foi discutido por Orange (1990) e, segundo ele, cabe ao professor trabalhar na transposição didática interna, transformando o saber ensinado sob três aspectos: epistemológico, psicológico e pedagógico: *”o primeiro concerne à prática de referência e a significação dos problemas que ela tenta responder; o segundo, o aluno, suas representações, suas estratégias de resolução de problemas, os obstáculos que ele encontra; o terceiro, a estrutura escolar e as condições de ensino”* (ORANGE, 1990, p.3).

A análise da Transposição Didática é importante, uma vez que ela é uma referencial analítico. Entretanto, ela não trata explicitamente de como um saber deve ser trabalhado tanto nos materiais didáticos, quanto em sala de aula. De modo geral, a TD não tem uma proposta metodológica a ela associada. No nosso trabalho, usamos os conceitos e termos dela de maneira instrumental, pois suas definições esclarecem os vários processos que ocorrem desde a produção do conhecimento até a sala de aula.

1.3 Massa e Energia: Três Contextos

Neste capítulo abordamos o ensino da massa e energia. Inicialmente, apresentamos como estes conceitos aparecem em elementos institucionais no IFUSP e, também, em alguns livros-texto. Em seguida, foi feita uma breve discussão sobre o percurso epistemológico dos saberes no referencial da transposição didática. Nesta seção, discutimos estes conceitos físicos com o principal objetivo de enfatizar os elementos teóricos acerca da massa e energia, que embasaram o desenvolvimento da sequência didática, apresentada no capítulo 3.

A massa é um dos conceitos centrais da física. Ela foi introduzida no século XVII por Isaac Newton, iniciando uma tradição na qual *massa* e *matéria* passaram a ser consideradas como sinônimos. Uma parte importante do trabalho de Newton foi dedicada a este conceito e ele o empregou na sistematização das leis dinâmicas do movimento de um corpo. Ele relacionou o conceito de massa/matéria a outros conceitos, tais como *força*, *quantidade de movimento*, *variação de velocidade*, etc. Além disso, Newton também conferiu à matéria a propriedade de atrair outros corpos, formulando a lei da gravitação universal. Assim, desde meados de 1670, a massa passou a estar associada às propriedades da **inércia** e da **gravitação**.

Muitos conceitos da física surgiram e, posteriormente, foram abandonados, como por exemplo, o *éter* e o *calórico*. Outras entidades, ainda, que foram importantes no passado, perderam gradativamente o seu papel principal e, atualmente, só têm significado em alguns

contextos limitados. A *força* é uma delas, que, embora não tenha sido descartada totalmente da física, só tem papel na mecânica newtoniana e no eletromagnetismo. O conceito de força na acepção newtoniana é pouco mencionado nas relatividades restrita e geral, bem como na física de partículas e nuclear. O conceito de massa, entretanto, continua muito presente na física atual.

A massa nasceu na Mecânica Newtoniana. Após dois séculos, ela continua presente na Relatividade Restrita. Além disso, a massa continua presente na Mecânica Quântica, na Física Nuclear e na Física de Partículas. Mais recentemente, na fronteira da física, o conceito de massa é imprescindível para o entendimento das partículas elementares com o **bóson de Higgs**. O conceito de massa perdurou durante quatro séculos de desenvolvimento da física e se mantém, com enorme vitalidade, como uma ideia fundamental e central nas diferentes áreas da ciência. Contudo, em cada um dos contextos que citamos, o **significado da massa** mudou. Em cada área da física, a massa tem um significado diferente, que é dado pela sua relação com outros conceitos e pelas práticas envolvidas.

Para entender a trajetória da massa, convém discutir um pouco como se dá o processo de **significação** de um conceito. De modo geral, o significado de um conceito não está nele mesmo e é atribuído pelas relações dele com outros conceitos. O conhecimento científico está organizado em estruturas conceituais e o significado de cada um dos seus conceitos é determinado por um feixe de relações, como ilustrado na figura 1.3.1. Ela mostra uma rede de conceitos, onde cada nó tem seu significado dado pelas linhas que convergem para ele.

Figura 1.3.1: A rede (MACHADO, 2000, p.102)

Esta questão do significado de um conceito e sua relação com outros que o cercam é discutida por Alves (1981), através de uma *analogia*. Este autor expressa a relação de um conceito com o seu todo, por meio de um cachorro com diversas partes, como mostramos na figura 1.3.2, onde os pedaços são apenas manchas. Uma orelha visualizada isoladamente,

não é mais uma orelha. Ela perde o significado e, por estar descontextualizada, é apenas uma mancha sem função. Ao ver apenas a mancha, dificilmente alguém daria a ela o nome de *orelha*. O autor ainda afirma que

O que a psicologia da forma nos diz é que a percepção é um ato pelo qual organizamos dados soltos e isolados em totalidades significativas. É isto que conhecemos: a totalidade. As partes adquirem sentido na medida em que as identificamos como pertencentes a um todo (ALVES, 1981, p.153).

Figura 1.3.2: A parte e o todo (ALVES, 1981, p.154)

A analogia da estrutura conceitual com o desenho do cachorro sugere a ausência de significados de um conceito, quando apresentado isoladamente. No caso da física, os significados são determinados, principalmente, pelas relações matemáticas com outros conceitos.

Nesta seção, discutimos os significados do conceito de massa nos contextos da mecânica newtoniana, do eletromagnetismo e da relatividade restrita. Isto permitiu evidenciar processos de **re-significação**, onde a massa é posicionada em lugares diferentes em cada contexto. O conhecimento é organizado em estruturas conceituais, onde ocorrem *metamorfoses*, enfatizadas por Machado (2000, p.103). Estas metamorfoses correspondem a mudanças de significado de conceitos, promovidas pela reestruturação do conhecimento científico ao longo do desenvolvimento da ciência. No caso da massa, apresentamos três estruturas diferentes com a organização das suas partes determinada pela história da física.

Uma forma de representar visualmente a estrutura do conhecimento científico é através de *esquemas conceituais*. Considerando que o conhecimento da física envolve componentes não-verbais, a linguagem mais adequada para expressá-lo são os símbolos e relações ma-

temáticas. Fizemos esquemas conceituais dos três contextos considerados, para mostrar a mudança na organização das ideias em cada um deles. Esses esquemas se assemelham a mapas, que relacionam grandezas físicas e estruturam os conceitos. A ideia de *mapa conceitual* foi desenvolvida por Joseph Novak, que pretendia entender como ocorre a mudança de compreensão de conceitos de ciências (NOVAK e CANÃS, 2006). Sua pesquisa era baseada na ideia de *aprendizagem significativa* e *estrutura cognitiva* de Ausebel (AUSEBEL, NOVAK e HANESIAN, 1978). Posteriormente, outros autores se utilizaram de mapas como instrumentos didáticos de ensino de ciências e desenvolveram uma série de regras e hierarquias entre conceitos para organizar a estruturação deles (CANÃS et al., 2003; MOREIRA, 2003 e 2006).

Os esquemas conceituais que construímos são mais simplificados e se assemelham ao produzido por Salém (1986), para a eletrostática. O nosso esquema da mecânica organiza os conceitos newtonianos, o do eletromagnetismo é mais geral e organiza as entidades físicas por meio das equações de Maxwell. Por fim, o esquema da relatividade restrita mostra a mudança de posição que os mesmos conceitos da mecânica clássica sofreram.

• A Mecânica Newtoniana

A física do próprio Newton envolvia uma série de conceitos e foi revisada e formulada durante quase dois séculos. O que chamamos hoje de mecânica newtoniana incorpora essas modificações em organizações do conhecimento que originalmente não existiam. Alguns conceitos como *energia* e *campo gravitacional* não faziam parte da física de Newton. Embora a palavra *energia* fosse conhecida desde a Grécia antiga, o conceito de energia só entrou na física a partir da década de 1840, com os trabalhos de Mayer e Joule (MARTINS, 1984). O conceito de campo surgiu com o eletromagnetismo e, também, foi incorporado posteriormente na mecânica newtoniana.

A massa na física clássica está fortemente ligado à **inércia**. A 1ª lei de Newton da dinâmica diz respeito à manutenção do movimento de um corpo na ausência de força. Todo corpo livre de forças se move no espaço com velocidade constante. Os conceitos de espaço e tempo são muito importantes na mecânica clássica. A ideia clássica de **espaço** tem cerca de cinco séculos e corresponde a um conjunto de pontos, tridimensional e infinito. Ele é métrico, ou seja, existe a noção de distância entre dois pontos quaisquer. Além disso, as suas propriedades são as mesmas em qualquer região da sua extensão e ele não possui direções

privilegiadas. Estas duas últimas características são conhecidas como **homogeneidade** e **isotropia** do espaço. A concepção clássica do tempo corresponde a uma sucessão de instantes, unidimensional, contínua e uniforme, com uma direção, indo do passado para o futuro, sem volta. Ele e o espaço são considerados independentes um do outro e **absolutos** na mecânica. O **princípio da inércia** está intimamente relacionado às propriedades do tempo uniforme e do espaço homogêneo e isotrópico, sendo considerada como uma propriedade natural das massas. A 1ª lei de Newton evidencia e ilumina o palco do universo físico clássico.

Conceituar a massa isoladamente é uma tarefa muito difícil. Por isso, nossa estratégia de ensino, para descrever o seu significado, foi cercá-la com outros conceitos da mecânica, tais como a força, a quantidade de movimento e a energia. A relação da massa com a força é bem estabelecida pela 2ª lei de Newton. Ela descreve a ação da força em um corpo e, o seu efeito, durante um intervalo de tempo, é proporcional à variação da velocidade. A expressão que representa essa ideia é

$$\vec{F} \, dt = d (m \, \vec{v}) \quad ,$$

e ficou conhecida como Teorema do Impulso. Newton chamava o termo $m \, \vec{v}$ de *quantidade de movimento* e, atualmente, esta grandeza costuma ser chamada de momento linear, representado pela letra $\vec{p}$. Este resultado mostra que a ação de uma força sobre uma massa é alterar a sua velocidade e a dificuldade de isso acontecer está ligada à sua **inércia**.

Outro efeito da força sobre uma massa ocorre quando ela se desloca no espaço. Partindo da 2ª lei de Newton, é possível mostrar⁴ que

$$\vec{F} \cdot d\vec{r} = d \left(\frac{m \, v^2}{2} \right) \quad .$$

O produto $m \, v^2$ foi enfatizado por Leibniz e tem relação com o *Teorema das Forças Vivas*. Hoje, dizemos que $\frac{m \, v^2}{2}$ é a *energia cinética* de um corpo e o teorema foi renomeado como Teorema da Energia Cinética. A ideia de pensar nos dois tipos de ação da força, que pode parecer simples tal como apresentamos, gerou, do ponto de vista histórico, um debate acalorado⁵ que durou cerca de 100 anos, entre os adeptos de Newton e Descartes

⁴Todo o desenvolvimento teórico e cálculo que apresentamos nesta seção podem ser encontrados no material escrito para o curso, anexado no apêndice.

⁵Em 1686, Isaac Newton comunica à Royal Society de Londres sua hipótese sobre a gravitação universal. Em seguida, no mesmo ano, Leibniz publica um artigo, contra a física cartesiana, intitulado "Breve demonstração do memorável erro de Descartes e outros, sobre a Lei da Natureza".

de um lado e os de Leibniz do outro. Ele só foi resolvido por D'Alembert, que demonstrou que as duas visões não eram incompatíveis entre si.

As expressões dos teoremas relacionam massa e força de uma maneira direta e, por isso, eles auxiliam na revelação do significado da massa.

Para completar o quadro da mecânica, é relevante citar a Lei da Gravitação Universal, onde a massa também desempenha um papel importante. Esta lei descreve a força devida a um par de massas, que se atraem mutuamente. O módulo dessa força pode ser expresso matematicamente por

$$F = G \frac{M m}{d^2} \quad ,$$

onde G é a chamada *constante de gravitação universal*.

Na mecânica newtoniana, a energia também está relacionado à massa gravitacional. Partindo do teorema da energia cinética, é possível mostrar⁶ que a energia mecânica do sistema, dada pela soma das componentes cinética e potencial, se conserva:

$$d \left(- \frac{GMm}{r} + \frac{m v^2}{2} \right) = 0 \quad .$$

Em cada um dos termos da energia, a propriedade relevante da massa é diferente. No termo cinético, a massa está associada à inércia, enquanto que no potencial, ela está associada à atratibilidade.

A relação da massa com os demais conceitos da mecânica pode ser visualizada na esquema conceitual, apresentado na figura 1.3.3.

É importante mencionar que este esquema é um esboço de organização dos conceitos da mecânica. Algumas caixas representam conceitos e outras, características ou propriedades de conceitos. Por isso, alguns traços representam relações matemáticas e outros, apenas ligações entre conceitos, sem envolver equações.

⁶A demonstração completa está no material escrito para o curso, anexado no apêndice.

Figura 1.3.3: Esquema conceitual da mecânica

As relações da força $\vec{F}$ com o momento linear $\vec{p}$ e com a energia E são dadas pelos teoremas do impulso e da energia cinética, respectivamente. Eles estão indicados nos caminhos do mapa de cores azul e vermelha.

As duas propriedades da massa, inércia e atratividade, estão simetricamente representadas no esquema. A característica inercial da massa se relaciona mais diretamente à quantidade de movimento, representada pelos caminhos de cor verde. A característica gravitacional da massa está indicada pela cor laranja.

Para completar o esquema, introduzimos os conceitos de *espaço* e *tempo*, pois eles são muito importantes na mecânica. Eles representam um palco pré-existente onde todos os fenômenos físicos acontecem e estão relacionados ao momento linear e à energia, respectivamente, pelo teorema de Nöether. Em 1918, este teorema associou a conservação da energia à uniformidade do tempo U e a conservação dos momentos linear e angular $\vec{L}$ à homogeneidade H e isotropia I do espaço. Por isso, indicamos essas relações na região superior do esquema.

• O Eletromagnetismo

O eletromagnetismo está associado a uma quantidade muito grande de fenômenos físicos e a sua teoria envolve poucas entidades básicas. São elas: espaço e tempo (r, t) , carga elétrica (q) , campos elétrico e magnético $(\vec{E}$ e $\vec{B})$ e força $(\vec{F})$. Na teoria eletromagnética, os principais atores são as cargas elétricas e os campos. A partir do século XIX, os campos assumem um lugar muito importante na física e, gradativamente, passam a ser considerados entidades substantivas.

Os fenômenos do eletromagnetismo são associados a interações mediadas pelos campos, que são descritos pelas quatro equações de Maxwell. A primeira delas, a lei de Gauss, relaciona o campo elétrico à carga e o seu conteúdo físico é expresso através da equação

$$\oiint \vec{E} \cdot \vec{n} \, dS = \frac{q_{int}}{\epsilon_o} \quad ,$$

onde ϵ_o é a permissividade elétrica do vácuo. Estando as entidades carga e campo diretamente relacionadas, podemos pensar que estes dois entes são inseparáveis. Sempre que numa região do espaço existir carga, necessariamente existe campo elétrico e a lei de Gauss expressa esta inseparabilidade e a existência de uma única entidade, *carga-campo*.

Outra equação de Maxwell, chamada lei de Faraday, relaciona os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$. Segundo ela, a variação temporal do campo magnético é a causa do aparecimento de um campo elétrico. A expressão matemática que representa essa ideia é:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{C} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS \quad .$$

Sempre que existir uma variação temporal de campo magnético, um campo elétrico será criado no espaço. Assim, o campo elétrico, além de ser causado por cargas, também pode ser devido à variação temporal de $\vec{B}$.

A terceira equação é a lei de Ampère-Maxwell e o seu conteúdo está relacionado com a existência de um campo magnético sempre que tivermos corrente elétrica ou variação temporal de campo elétrico. Ela é descrita pela expressão

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{C} = \iint \left(\mu_o \vec{j} + \epsilon_o \mu_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot \hat{n} \, dS \quad ,$$

onde μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo. Deste modo, a existência de um campo magnético $\vec{B}$, de maneira análoga à lei de Faraday, é associada à variação temporal do

campo elétrico $\vec{E}$ e, também, à densidade de corrente elétrica $\vec{j}$, representadas pelos 2º e 1º termos do lado direito, respectivamente.

A lei de Gauss magnética é a quarta equação de Maxwell. Ela apenas relaciona o campo magnético com ele mesmo, e significa que não existe monopólo magnético e que as linhas de campo magnético são sempre fechadas. A expressão matemática que descreve a lei de Gauss magnética é

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad .$$

As equações de Maxwell têm muitas consequências fenomenológicas. Uma delas, especialmente importante, é a obtenção da equação de onda que descreve a propagação dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ no vácuo. Essas equações⁷ mostram que a velocidade das ondas eletromagnéticas é dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad . \quad (1.3.1)$$

Este resultado realça a importância das constantes do vácuo ϵ_0 e μ_0 , que aparecem no eletromagnetismo. Isoladamente, cada uma delas representa um aspecto da natureza, entretanto, elas juntas determinam a constância do módulo da velocidade da luz no vácuo. A velocidade c , ligada a ϵ_0 e μ_0 , representa um *broto* dentro do eletromagnetismo que florescerá na relatividade restrita de Einstein.

Na teoria eletromagnética, o conceito de massa não aparece diretamente, embora já começassem a aparecer indícios muito importantes do desacoplamento dos conceitos de inércia e massa. Um deles passa pela expressão da força de Lorentz e outro, pela energia do campo.

No eletromagnetismo, campos elétricos e magnéticos podem criar forças sobre cargas. Estas forças podem ser expressas por

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad . \quad (1.3.2)$$

Para entender a **inércia de uma onda**, consideramos uma situação na qual um corpo é atingido por uma onda eletromagnética. Os campos elétrico e magnético oscilantes criam uma força nos elétrons que constituem o corpo. Essa força tem duas componentes perpendiculares entre si, uma de origem elétrica e outra, magnética. A de origem elétrica promove

⁷A dedução das equações da onda eletromagnética a partir das equações de Maxwell podem ser encontradas em Kneubil (2006).

uma oscilação no elétron na direção do campo $\vec{E}$ da onda incidente, que é perpendicular à velocidade da onda. Porém, a componente magnética atua sobre o elétron na mesma direção da onda incidente, provocando-lhe um **impulso**⁸. Este impulso está relacionado com a variação da quantidade de movimento do elétron e, portanto, podemos dizer que a **onda transferiu momento** para o corpo. Este aspecto é análogo à situação em que dois corpos se chocam, havendo transferência de momento de um para o outro. No entanto, neste exemplo, a onda que incide no corpo, **não tem massa**, mas é portadora de inércia, tanto quanto corpos com massa.

A inércia da onda também se manifesta no processo de radiação e está relacionada à energia. O conceito de energia dentro do eletromagnetismo é fundamental, pois à toda região do espaço onde existirem campos elétrico e magnético, associa-se um energia U . A densidade dessa energia é dada por

$$\frac{dU}{dV} = \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2 + \frac{\vec{B}^2}{2 \mu_0} .$$

Esta expressão é muito poderosa, pois permite calcular a energia eletromagnética de um sistema em qualquer situação. Ela indica que **onde há campo há energia**. No eletromagnetismo, a energia está associada aos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ de maneira tão direta, que dizer '**campo tem energia**', é quase equivalente a dizer '**campo é energia**'. A expressão para dU/dV permite, por exemplo, entender a energia potencial de sistemas, tais como capacitores carregados ou duas cargas puntiformes, em termos da energia de origem elétrica, distribuída no espaço⁹. O mesmo se aplica para a auto-energia de uma carga pontual.

Estes exemplos que citamos dizem respeito a campos **estáticos**. Para campos que se propagam no espaço, temos energias elétrica e magnética sendo carregadas por eles, como é o caso da luz. A intensidade de uma onda eletromagnética é associada ao fluxo do vetor de Poynting $\vec{S}$, que é dado por

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} .$$

O caráter inercial da energia eletromagnética torna-se mais claro no caso da radiação associada à aceleração ou desaceleração de cargas. Quando uma carga é freada, a inércia do

⁸Ver material escrito, capítulo 5.7.

⁹O uso desta expressão e o cálculo da energia eletromagnética destes sistemas podem ser encontrados no material escrito, capítulo 5, seções 1, 2, 3 e 4.

campo elétrico se manifesta e suas linhas são deformadas. Estas deformações se propagam no espaço com velocidade c e, nesta região temos um pulso de onda eletromagnética¹⁰.

A deformação das linhas de campo causada pela radiação abre a possibilidade para que a interação entre duas cargas puntiformes não obedeça a lei newtoniana da *ação e reação*. Esse caso evidencia uma limitação da 3ª lei de Newton. Entretanto, a quebra desta lei não invalida a conservação do momento, pois mesmo sem ter massa, onda carrega momento.

Para representar os conceitos do eletromagnetismo que acabamos de abordar, elaboramos mais um esquema, apresentado na figura 1.3.4. Ele é bastante sintético e apenas organiza as entidades que citamos e as equações de Maxwell.

Figura 1.3.4: Esquema conceitual do eletromagnetismo

A lei de Gauss magnética não está representada e as outras três equações de Maxwell correspondem às linhas azuis. A relação entre a velocidade da luz c e as constantes do vácuo ϵ_0 e μ_0 está dada pelas linhas laranjas. A força de Lorentz que relaciona a carga

¹⁰A discussão detalhada desse problema está no material escrito anexado, capítulo 5.8.

com os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ está nas ligações de cor vermelha. Por fim, os conceitos de energia U e intensidade de onda $\vec{S}$, relacionados aos campos, estão indicados pelos traços de cor verde.

No cenário da mecânica clássica newtoniana, que apresentamos anteriormente, o momento linear $\vec{p}$ está relacionado à inércia da massa por $\vec{p} = m\vec{v}$. No cenário do eletromagnetismo, as ondas eletromagnéticas também carregam e transferem momento e a **luz** passa a ter propriedades semelhantes à **massa**. Um feixe de luz, por exemplo, caminhando num espaço vazio se propaga em linha reta e não altera sua velocidade. Essas características são análogas às de um movimento de um corpo newtoniano livre de forças. Isso sugere que a luz, mesmo sem ter massa, também tem inércia.

Embora o conceito de massa não apareça explicitamente no esquema conceitual do eletromagnetismo, a inércia aparece, relacionada ao campo eletromagnético. Na mecânica newtoniana, penduramos energia e momento na massa e afirmamos que: (i) um corpo tem energia cinética dada por $\frac{1}{2} m v^2$, (ii) um corpo tem momento linear dado por $m \vec{v}$ e (iii) um corpo tem inércia. Com o eletromagnetismo, o sujeito das três frases pode mudar de 'corpo' para 'onda', e continuamos a afirmar que: (i) onda tem energia, (ii) onda tem momento linear e (iii) onda tem inércia.

• A Relatividade Restrita

A teoria da relatividade restrita nasceu dentro do eletromagnetismo, onde teve início a transferência da propriedade da inércia da massa, para a energia. A teoria de Einstein utiliza referenciais em movimento relativo e as observações de fenômenos físicos são feitas a partir deles. Ela relaciona a descrição destes fenômenos e tem o propósito de encontrar, por trás das aparências experimentais, as leis absolutas que os determinam. Neste contexto, um elemento muito importante da teoria é a ideia de que não existem referenciais privilegiados.

A teoria é baseada em dois postulados, propostos por Einstein em 1905: (1) as leis físicas têm a mesma forma em todos os sistemas de referência inerciais e (2) em qualquer sistema inercial, o módulo da velocidade da luz c é sempre o mesmo. O primeiro postulado representa a fé em uma equivalência entre todos os referenciais inerciais. Já o segundo, é mais específico, elevando o módulo da velocidade da luz ao nível de grandeza absoluta. Assim, a teoria é consequência destes dois postulados, inclusive a distinção entre os absolutos e os relativos.

Na relatividade, eventos físicos são muito importantes. Um evento é um acontecimento, que pode ser descrito em um referencial por quatro coordenadas: *um* instante no tempo e *um* ponto no espaço tridimensional. A ocorrência de um evento é considerada absoluta, isto é, se ele ocorreu em um referencial, ele ocorrerá também em todos os demais. Por outro lado, o instante e a posição nos quais ele ocorre, dependem do referencial. A teoria é baseada na ideia de que cada observador, em cada referencial, descreve o mesmo evento de forma diferente. Como o evento é o mesmo, estas diferentes descrições guardam relações bem definidas umas com as outras. As regras que permitem encontrar as visões de outros observadores a partir de uma delas, são as *transformações de Lorentz*.

Se dois observadores, Maria e João, estiverem em referenciais diferentes, um evento é descrito em cada um deles por um ponto, com quatro coordenadas:

$$\text{MARIA : } (x^M, y^M, z^M; t^M) \quad \longleftrightarrow \quad \text{JOÃO : } (x^J, y^J, z^J; t^J)$$

Evento

Se João se move em relação a Maria com velocidade constante v , ao longo do eixo y , as operações matemáticas que transformam o conjunto de quatro coordenadas do intervalo entre os mesmos eventos, do referencial S^M para S^J , são as transformações de Lorentz mostradas abaixo. A dedução delas pode ser encontrada em Bechara et al. (2008).

$$\begin{aligned} x^J &= x^M , \\ y^J &= \gamma (y^M - v t^M) , \\ z^J &= z^M , \\ t^J &= \gamma (t^M - \frac{v}{c^2} y^M) . \end{aligned}$$

onde γ é chamado *fator de Lorentz* e vale

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} .$$

A relatividade restrita fundiu os conceitos de espaço e tempo em uma única entidade, chamada *espaço-tempo*, e o palco dos acontecimentos físicos torna-se quadridimensional. As quatro coordenadas de um evento passam a ser consideradas componentes de um *quadrivetor*, que define a posição de um evento no espaço-tempo. Esse quadrivetor¹¹, num

¹¹Na relatividade restrita, representamos os quadrivetores sem a 'flecha' e costuma-se multiplicar a componente temporal por c , para que ela tenha a mesma dimensão das demais.

referencial J , é escrito como

$$r^J = (x^J, y^J, z^J; ct^J) \quad .$$

Os quadrivetores nos permitem construir invariantes na relatividade restrita, isto é, grandezas que não dependem do referencial. A operação necessária é o produto escalar, análogo ao da geometria espacial. A definição do produto escalar na relatividade restrita é diferente, pois a componente relativa ao tempo não tem a mesma qualidade que as outras três. O módulo do quadrivetor r^J no espaço quadridimensional é chamado de intervalo relativístico e^2 , e é dado por

$$e^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad .$$

É importante notar que, nesta expressão, os sinais das componentes temporal e espaciais são diferentes.

Um produto escalar importante na relatividade restrita é o **tempo próprio**, representado por τ . Ele foi introduzido por Minkowski e, juntamente com c e o evento, é mais um dos absolutos da relatividade restrita. Embora este invariante seja chamado de 'tempo', ele, de fato, não vive na dimensão da coordenada temporal. Por ser independente do referencial, o tempo próprio τ está num mundo mais abstrato e, é o mesmo para qualquer observador. Apenas para o referencial no qual o relógio está em repouso, τ coincide com a coordenada tempo t deste referencial.

O conceito de tempo próprio é fundamental para chegar à massa, na relatividade. Ele permite definir a *quadrivelocidade*, no referencial J , como

$$\frac{dr^J}{d\tau} = \left(\frac{dx^J}{d\tau}, \frac{dy^J}{d\tau}, \frac{dz^J}{d\tau}, \frac{dt^J}{d\tau} \right) \quad ,$$

e, conseqüentemente, construir o *quadrimento*, multiplicando-a pela massa. Desta forma, escrevemos

$$p^J = m \frac{dr^J}{d\tau} = \left(m \frac{dx^J}{d\tau}, m \frac{dy^J}{d\tau}, m \frac{dz^J}{d\tau}, m \frac{dt^J}{d\tau} \right) \quad .$$

Em termos da velocidade usual do corpo (v_x, v_y, v_z) , o *quadrimento* é reescrito como

$$p_x^J = \gamma m v_x^J \quad ,$$

$$p_y^J = \gamma m v_y^J \quad ,$$

$$p_z^J = \gamma m v_z^J \quad e$$

$$p_t^J = \gamma m c \quad .$$

O produto escalar do quadrimomento por ele mesmo também é um invariante relativístico¹² e é dado por

$$\begin{aligned} p^2 &= (p_t^J)^2 - (p_x^J)^2 - (p_y^J)^2 - (p_z^J)^2 \\ p^2 &= m^2 c^2 \end{aligned}$$

Como este resultado só depende de m e da constante c , ele significa que a massa é um **invariante** na relatividade restrita.

Por razões dimensionais, a quarta componente do momento, a coordenada p_t , está associada à **energia**, por

$$E^J = c p_t^J .$$

Isto permite escrever a energia de um corpo como

$$E^J = \gamma m c^2 .$$

Esta energia relativística depende do fator γ que, por sua vez, depende da velocidade v . Isso evidencia que a energia de um corpo depende do referencial. **A massa m é invariante**, assim como o tempo próprio τ . Ela é descrita em cada referencial de maneira diferente, através da energia.

As três coordenadas espaciais do momento na relatividade restrita podem ser escritas em função da velocidade v e da energia. Usando as eqs. de p_x , p_y e p_z , podemos escrever que

$$\vec{p}^J = \frac{E}{c^2} \vec{v}^J .$$

Esta equação relativística é diferente da usada na mecânica de Newton, onde o momento é dado pelo produto $m\vec{v}$. Na versão relativística, quem faz o papel de 'massa' é a energia e o fator $\frac{E}{c^2}$ do momento representa a **inércia** do corpo. Isso significa que, na relatividade restrita, quem tem inércia não é a massa, mas sim a energia.

¹²Toda dedução detalhada por ser vista no capítulo 6.6 do material escrito, anexado no apêndice.

Figura 1.3.5: Esquema conceitual da Relatividade Restrita

Mostramos na figura 1.3.5, nosso esquema conceitual para a relatividade restrita. A teoria parte dos dois postulados básicos e o módulo da velocidade da luz c é a primeira grandeza absoluta. Representamos as grandezas invariantes em azul, num eixo central imaginário, dividindo o mapa em dois lados simétricos. Cada lado representa um referencial diferente. O conceito de referencial é essencial na teoria, pois toda ela nasce do desejo de descrever a mesma física em diferentes referenciais. Cada referencial tem as grandezas relativas a ele. Pintamos os traços associados a cada um deles de cores diferentes: vermelho e verde.

A operação matemática que permite fazer uma mudança de referencial são as transformações de Lorentz (T.L. no esquema). Elas intermediam o traço laranja que une os dois conjuntos de coordenadas $(x, y, z; ct)$, passando pelo EVENTO, que é considerado absoluto. Logo abaixo dele, aparece outra grandeza invariante, o intervalo relativístico. Um desses intervalos é o **tempo próprio**, que é outro absoluto. Em cada referencial, o quadrimomento está relacionado ao tempo próprio τ passando pela quadrivelocidade. O

quadrimento engloba a energia e o trimomento, que também são colocados nos dois referenciais. Por fim, temos a inércia associada à energia, indicando que ela depende do referencial.

1.4 A Re-significação da Massa

A discussão feita na seção anterior tem um caráter teórico-conceitual e está sintetizada nos esquemas apresentados. Eles permitem acompanhar as mudanças de posição dos conceitos em cada contexto, que, de fato, indicam mudanças de significado que eles tiveram ao longo do desenvolvimento da física.

Os elementos mais básicos da mecânica, que fazem parte do *palco*¹³ do universo físico clássico, são o **espaço** e o **tempo**. Na física clássica estes conceitos são considerados absolutos e independentes, como vimos no esquema da mecânica. Na relatividade houve uma re-significação destes conceitos, que deixaram de ser absolutos e passaram a ser partes de uma entidade mais abrangente, denominada *espaço-tempo*.

Com isso, o conceito de grandeza escalar também foi modificado. Enquanto que na mecânica newtoniana dizemos que o tempo e a energia são grandezas escalares, na relatividade, um escalar é uma grandeza invariante por mudança de referencial. Assim, por exemplo, o tempo e a energia deixam de ser escalares na relatividade, tornando-se as quartas componentes dos quadrivetores r e p , respectivamente, como indicado abaixo.

$$\begin{aligned} r &= (x, y, z; t) = (x, y, z; ct) \\ p &= (p_x, p_y, p_z; p_t) = (p_x, p_y, p_z; E) \end{aligned}$$

Isto enfatiza a unificação do espaço com o tempo, no *espaço-tempo*, e do momento com a energia, no *momento-energia*.

Na discussão que fizemos, a massa m foi descrita como sendo um invariante relativístico. A energia, por outro lado, foi expressa por $E = \gamma mc^2$, onde γ é o fator de Lorentz, que incorpora a noção de referencial, indicando que a energia é um conceito relativo.

Neste ponto, é interessante comparar a nossa expressão $E = \gamma mc^2$ com a famosa fórmula $E = mc^2$. As diferenças entre ambas são apenas aparentes e associadas a convenções. O fator γ da primeira expressão foi incorporado ao símbolo m , na segunda. Este

¹³Ver discussão detalhada do capítulo 1 do material escrito.

procedimento é o mais comum e aparece em muitos livros-texto e, a bem da precisão, requer o uso de dois termos para a massa, a *massa inercial*, representada por m , e a *massa de repouso*, indicada por m_0 . Formalmente, estas massas são relacionadas por

$$m = \gamma m_0 \quad .$$

Na tabela abaixo, resumimos as diferenças entre a nossa apresentação (lado esquerdo) e a mais comumente usada (lado direito).

abordagem	nossa	mais comum	referencial
<i>massa</i>	m	m_o	não depende
<i>energia</i>	$E = \gamma mc^2$	$E = mc^2$	depende
<i>energia cinética</i>	$E_C = (\gamma - 1) mc^2$	$E_C = (m - m_0) c^2$	depende
<i>inércia</i>	$\frac{E}{c^2}$	m	depende

Como podemos ver no quadro, do ponto de vista numérico, as duas abordagens são equivalentes e permitem fazer cálculos em problemas que envolvem altas velocidades. Entretanto, embora elas carreguem a mesma física, do ponto de vista de educacional, elas tem implicações muito diferentes.

Na física, a forma matemática de apresentar uma ideia influencia a construção dos significados. Essa questão foi enfatizada por Feynman (2012), quando ele enuncia a lei da gravitação de três formas diferentes. Embora os três enunciados do autor sejam matematicamente equivalentes, ele argumenta que cada um deles descreve a natureza de maneira diferente. Este físico ainda complementa:

No caso de que estamos tratando, as teorias *são* equivalentes. Matematicamente, as três diferentes formulações - a lei de Newton, o método do campo local e o princípio de mínimo - têm exatamente as mesmas consequências. Então, que fazer? Os livros dizem que não podemos encontrar um critério científico para decidir entre elas. Isso está certo. Cientificamente, são equivalentes. É impossível tomar uma decisão: se todas têm as mesmas consequências, não há maneira experimental de distinguir entre elas, embora sejam muito diferentes do **ponto de vista psicológico**. Você pode gostar delas ou não, do ponto de vista filosófico; a prática é a única maneira de se ultrapassar esse limite. **Psicologicamente** elas são diferentes porque fornecem pontos de partida completamente distintos para se descobrirem novas leis (FEYNMAN, 2012, p.58, grifo nosso).

Por exemplo, na eletrostática, o campo elétrico $\vec{E}$ pode ser relacionado ao gradiente do potencial V , por $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$. Isto significa que, do ponto de vista puramente formal,

poderíamos escrever a expressão do campo coulombiano como

$$-\vec{\nabla}V = \frac{q}{4\pi\epsilon_o} \frac{1}{r^2} \hat{r} \quad .$$

No entanto, embora o seu conteúdo matemático seja idêntico ao da expressão usual, os seus potenciais ontológico e psicológico não o são.

Esse problema também está presente nas expressões usadas para descrever a massa na relatividade. Na abordagem mais comum, são usados dois símbolos associados a massas, m_0 e m , com significados físicos e matemáticos diferentes. O primeiro deles é um escalar relativístico, enquanto que o segundo, é relativo ao referencial. A adoção de dois termos para a massa, m_0 e m , é análoga ao caso dos tempos τ , próprio, e t , que depende do referencial. O uso da mesma palavra *massa* de dois modos diferentes é uma fonte de ambiguidade, para pessoas não muito familiarizadas com a teoria. Na abordagem comum, esta ambiguidade é alimentada pela expressão $E = mc^2$ da energia, onde m é chamada *massa inercial*, o que sugere ser esta massa a portadora da inércia. Isto faz com que, no âmbito do ensino, o estudante tenha que conviver com duas massas, uma das quais é constante e a outra, que aumenta com a velocidade.

Esta convivência com duas massas se acentua ainda mais na maneira de expressar a energia cinética. Vemos no quadro apresentado que, a energia cinética de um corpo na abordagem mais comum é dada por

$$E_C = (m - m_0) c^2 \quad .$$

Do ponto de vista operacional, esta expressão é equivalente a da nossa abordagem, no entanto, em relação à atribuição de significados dos conceitos, a subtração das massas ' $m - m_0$ ' não conduz um estudante a uma compreensão do conteúdo epistemológico e ontológico da massa que, de fato, é considerada para expressar a energia cinética do corpo.

Além disso, o termo *massa de repouso* pode sugerir uma referência apenas a um corpo parado e não, que se trata de um invariante relativístico. Este tipo de informação pode gerar *obstáculos didático-pedagógicos*¹⁴ à compreensão mais abrangente da teoria de Einstein.

Na nossa abordagem, por outro lado, o sentido da massa é único e a inércia é carregada pela energia. Consideramos esta opção mais conveniente por dois motivos. Do ponto de

¹⁴Segundo Brousseau (1986), os obstáculos didático-pedagógicos são obstáculos que aparecem durante o processo de ensino-aprendizagem. Eles podem ser originados por escolhas inadequadas do professor durante uma aula, na sua prática docente, e trazem ideias equivocadas acerca de um saber científico.

vista do ensino, o uso de uma única palavra sem qualificativos, contribui para um melhor entendimento do significado do conceito. Além disso, do ponto de vista ontológico, a associação da inércia diretamente com a energia, incorpora a ideia que entidades sem massa, tal como a luz, também carregam inércia. Este ponto de vista e a ambiguidade que citamos são consistentes com a prática da pesquisa acadêmica e muitos físicos e educadores têm apontado a problemática do uso dos termos *massa relativística* e *massa de repouso* (OKUN, 1989; HECHT, 2011 e 2006; VALADARES, 1993; OSTERMANN e RICCI, 2004).

* * *

A relatividade promoveu uma **ruptura** entre massa e energia e, historicamente, durante muito tempo, estes dois conceitos caminharam juntos. Na mecânica newtoniana eles estavam ligados através das expressões das energias $E_C = \frac{1}{2}mv^2$ e $E_P = -GMm\frac{1}{r^2}$. Neste contexto, um corpo com massa carrega energia e tem inércia. A partir do século XIX, os fenômenos eletromagnéticos começaram a mostrar que campo também tem energia e inércia. Até que, em 1905, com a relatividade, aconteceu a reestruturação da relação entre massa e energia. Estas duas grandezas passaram a ser distintas, dos pontos de vista matemático e ontológico, percorrendo caminhos diferentes, como mostramos na imagem da figura 1.4.1 (a). Antes de 1905, as propriedades da inércia e da atratibilidade estavam ligadas à massa. Depois da reorganização promovida pela relatividade restrita, a inércia começou a ser atribuída à energia.

Figura 1.4.1: Ruptura entre Massa e Energia

Uma década depois, com a teoria da relatividade geral, a atração gravitacional é transferida da massa para a energia. Uma implicação importante desta teoria é que, a energia,

além de ter inércia, pesa. A ilustração da figura 1.4.1 (b) mostra a 2ª ruptura ocorrida com a relatividade geral.

* * *

As transformações conceituais que a massa sofreu, descritas acima, podem ser incorporadas à discussão filosófica do *perfil epistemológico* de Bachelard (1940). Ele descreve as mudanças epistemológicas que ela sofreu, ao longo do desenvolvimento da ciência, através de doutrinas filosóficas. Este autor procura entender a evolução filosófica de um conhecimento científico por meio de fases, que vão do realismo ao ultra-realismo. Em cada uma delas, Bachelard atribui à massa percepções diferentes, que lhe fornece diferentes graus de significado. Numa primeira fase, que ele chama de *realismo ingênuo*, a noção de massa é relacionada à substância, a quantidades e '*concretiza o próprio desejo de comer*' (BACHELARD, 1940, p.13). Num segundo nível, a massa corresponde a uma medida precisa e direta. Nesta fase, chamada de *empirismo*, existe uma *objetividade instrumental* e a massa pode ser medida na balança.

A terceira fase filosófica nasce com Newton, na mecânica. Bachelard atribui significado à massa, através de outros conceitos e diz que '*a noção de massa define-se então num corpo de noções*' (idem, p.16). Nesta fase, chamada *racionalismo*, com a 2ª lei de Newton, o significado de massa é cercado pelos conceitos de força e aceleração e, portanto, só pode ser entendido através das relações entre eles. Em seguida à mecânica, a relatividade mostra uma complexidade da massa. Bachelard chama esta fase de *racionalismo completo* e afirma que ela passa a ter uma estrutura funcional interna. Diferentemente da noção da fase anterior, que era dada pelos outros conceitos, no racionalismo completo a massa é complexa em si e tem complicações internas. Por fim, a noção de massa ultrapassa as quatro filosofias anteriores. É uma noção de massa, segundo Bachelard, que nunca teria sido encontrada aprofundando a noção newtoniana e a relativista. Esta fase é chamada de *surracionalismo* e está relacionada à concepção de massa negativa da mecânica de Dirac.

Com o que apresentamos, é possível notar que as doutrinas filosóficas de Bachelard, mesmo sem explorar a relação da massa com a energia, guardam relação com as mudanças epistemológicas e conceituais que descrevemos na seção anterior.

* * *

Para concluir este capítulo, apresentamos algumas das implicações para a imagem da natureza, advindas do fato da inércia e da atributibilidade, que eram atributos da massa, te-

rem sido transferidas para a energia. A equivalência massa-energia tornou-se imprescindível na descrição de sistemas microscópicos, tais como átomos, núcleos e partículas. Por exemplo, a massa do átomo de hidrogênio inclui as massas do próton e do elétron e, também, as energias cinética e potencial. Isto indica que estes quatro ingredientes contribuem para o peso do átomo quando ele é colocado na 'balança'¹⁵.

Numa escala mais microscópica ainda, dentro do núcleo, a contribuição das energias cinética e potencial é, proporcionalmente, bem maior. No próton, por sua vez, o peso da energia é maior ainda, cerca de 99% do seu peso.

A energia pesa! Toda matéria palpável é feita de átomos e os átomos são constituídos de prótons e elétrons. Por exemplo, 99% do peso de uma cadeira é devido às energias cinética e potencial no seu interior. Isso ocorre porque 99% da massa do átomo é devida aos prótons e nêutrons e, 99% da massa dos prótons e nêutrons, é devida às energias cinética e potencial dos quarks.

Na relatividade, o peso dos corpos são dados pela energia que eles contém. Isso fica mais evidente no caso da luz, que mesmo sem ter massa, sofre atração gravitacional. Muitas lentes gravitacionais foram detectadas em estudos recentes de astrofísica. Os exemplos citados e inúmeros outros evidenciam a diferença entre as visões de mundo newtoniana e einsteiniana, acerca da matéria.

Entretanto, essas diferenças são ainda mais profundas. As propriedades atribuídas à matéria/massa no século XVII parecem ser características externas e manifestações para o mundo exterior. Newton olhou para a matéria e o que acontece com ela a partir dos limites do corpo para fora, atribuindo a ela as propriedades da inércia e da atratibilidade. Einstein, por sua vez, olhou para **dentro** da matéria e mostrou o seu interior, do que ela é feita. A matéria, a partir da relatividade, passa a ser feita de massa propriamente dita e de energia. A teoria permite o acesso à constituição íntima da matéria e a diferencia da massa, distinção esta, que no cenário newtoniano, não existia.

* * *

Encerramos aqui a discussão do conceito de massa nas relatividades restrita e geral, e suas mudanças de significado em relação à mecânica newtoniana. As ideias apresentadas neste capítulo, bem como os fenômenos descritos, foram usados no desenvolvimento da nossa proposta de curso. O *design* e as estratégias didáticas empregados estão descritos a seguir.

¹⁵Ver capítulo 7.4, 7.5 e 7.6 do material escrito.

Capítulo 2

A Pesquisa Baseada em Design

Neste capítulo apresentamos a metodologia que guiou o desenvolvimento da sequência didática sobre o conceito de massa. Descrevemos as etapas do processo de confecção, como uma forma de produzir material didático relacionado a um tema específico.

Esta metodologia, chamada pesquisa baseada em *design* (DBR¹), é uma linha que surgiu na década de 1990, para desenvolver um método *intervencionista*, que busca aliar aspectos teóricos da pesquisa em educação com a prática. Ela foi introduzida no âmbito da educação por Brown (1992) e Collins (1992) e, juntamente com eles, outros autores passaram a usar termos parecidos para se referir a um desenvolvimento didático, tais como *design experiment* (BROWN, 1992), *developmental research* (RICHEY et al., 2004) e *design-based research* (DBR-COLLECTIVE, 2003).

Um conjunto de autores agrupados sob o nome de DBR-Collective (2003) define a DBR como uma atividade que combina empiricamente a pesquisa educacional teórica com ambientes de aprendizagem e, a consideram uma metodologia importante para a compreensão de **como**, **quando** e **por que** inovações educacionais funcionam na prática. A metodologia DBR consiste numa espécie de gerenciamento do processo de implementação de uma inovação educacional no contexto real. Assim, a DBR pode ser considerada uma *teoria sobre a metodologia*, que visa organizar de maneira coerente o processo de levar à sala de aula uma inovação curricular.

A pesquisa baseada em *design* gerencia o processo como um todo, desde a ideia da inovação/criação até sua efetiva implementação em um ambiente real. Além disso, a teoria envolve uma análise do processo inteiro e não apenas do produto final, pois os resultados

¹Sigla vinda do inglês: *Design Based Research*.

tirados dela deverão ser incorporados na própria metodologia, visando seu aprimoramento. Por isso, uma importante característica da DBR é sua operação em *ciclos*, já que o aprendizado de um primeiro *design* deve ser usado nos seguintes. Collins et al. (2004) compara a pesquisa DBR com o processo que ocorre em indústrias automotivas. Segundo ele,

experimentos de design foram desenvolvidos como uma forma de realizar uma pesquisa formativa para testar e aperfeiçoar projetos educacionais com base em princípios teóricos derivados de prévia pesquisa. Esta abordagem de refinamento progressivo em 'design' envolve a colocação de uma primeira versão de um projeto para o mundo ver como ele funciona. Em seguida, o projeto é constantemente revisado baseado na experiência, até que todos os erros sejam trabalhados. O refinamento progressivo na indústria de carros foi lançado pelos japoneses, que ao contrário dos fabricantes americanos de automóveis, atualizam seus projetos com frequência, ao invés de esperar anos para um modelo de transição para aperfeiçoar projetos passados. A abordagem é também a base do estudo das aulas japonesas, onde grupos de professores se reúnem para aperfeiçoar suas práticas de ensino (COLLINS et al, 2004, p.18, tradução nossa).

É importante ressaltar que, pelo caráter intervencionista que a metodologia DBR tem, ela promove uma ligação entre as dimensões teórica e prática, buscando fazer contribuições em ambas. Van den Akker (1999) enfatiza que a inter-relação entre a teoria e a prática é tão complexa e dinâmica, que a aplicação direta da teoria não é suficiente para resolver alguns tipos de problemas práticos. Ele ainda afirma que *"sem o envolvimento cooperativo de pesquisadores e profissionais, não é possível ter uma clareza sobre os problemas advindos da implementação e gerar medidas efetivas para reduzi-los"* (VAN DEN AKKER, 1999, p.9, tradução nossa). Podemos representar, de maneira simplificada, a ideia da metodologia DBR, através de um esquema, como o mostrado na figura 2.0.1.

Figura 2.0.1: Esquema geral da metodologia DBR

O processo de implementação de uma inovação nasce de um desejo de aplicar algum princípio teórico a um ambiente real, que poderia, por exemplo, ser a sala de aula. O gerenciamento do processo inteiro é feito pela metodologia DBR, incluindo a implementação do *produto* desenvolvido no *design*.

Os *princípios de design* estão associados à dimensão teórica do conhecimento e podem ter diferentes status. Para uma intervenção educacional, por exemplo, pode-se pegar um princípio de uma teoria de aprendizagem ou cognitivista e desenvolver um material para ser aplicado num ambiente escolar. Neste caso, o material desenvolvido teria o objetivo de reforçar, testar ou extrair algum resultado a respeito do princípio escolhido. No caso da engenharia, pode-se pegar um princípio teórico da física dos materiais para desenvolver, por exemplo, uma peça de avião que resista a diferenças de temperatura e pressão. Em princípio, a metodologia DBR fornece ferramentas para gerenciar o desenvolvimento/design de um *produto* aplicável em situações reais, para qualquer área do conhecimento. Os *princípios de design* norteiam o processo, funcionando como *pilares* apoiados em teorias de quaisquer áreas do conhecimento. A metodologia DBR não emprega uma única teoria e pode ser apoiada em vários elementos parciais de teorias maiores. Por outro lado, o processo de design deve também ser subsidiado por informações de natureza mais concreta e real, ou seja, de natureza prática, pois espera-se que o produto final seja o mais adequado possível a uma dada realidade.

No contexto da educação, o processo de desenvolvimento é feito, em geral, por uma equipe composta por pesquisadores da área e professores, pois estes últimos estão, efetivamente, em sala de aula. A participação de professores no *design* é fundamental e torna o processo mais rico, já que eles trazem elementos da sua prática diária que podem ser levados em conta para uma melhor adequação daqueles princípios a um contexto específico onde o "produto" será implementado.

Sendo uma teoria sobre a metodologia, a pesquisa baseada em *design* pressupõe uma análise sobre o processo. Isso significa que usando a DBR para desenvolver algum produto, aprende-se **sobre o processo**. Assim, a análise sobre o processo e sobre a implementação deve gerar resultados que poderão ser usados num *design* posterior. Esses resultados são incorporados na própria DBR e permitem reiniciar o ciclo através do re-*design*, o que torna a metodologia muito dinâmica. Collins et al. (2004) ressaltam que

(...) a análise do processo leva ao refinamento no design, mas também alimenta um refinamento na teoria. A pesquisa em design deve sempre ter o objetivo duplo de aprimorar tanto a teoria quanto a prática.(...) Quando alguns aspectos do design não funcionam, a equipe de design, incluindo o professor, deve considerar diferentes opiniões para melhorar o design na prática e instituir mudanças no design tão frequentemente quanto necessário.(COLLINS et al., 2004, p.19, tradução nossa).

A metodologia DBR oferece ferramentas para analisar um problema e gerenciar o desenvolvimento de intervenções. Ao final do processo, espera-se a construção de novos conhecimentos teóricos (VAN DEN AKKER, 1999; WANG e HANNAFIN, 2005; EDELSON, 2002; DBR-COLLECTIVE, 2003) e princípios que possam ser transferíveis para outros contextos onde se deseja promover uma intervenção. Na área de educação, por exemplo, ela pode ser empregada em estudos que investigam estratégias mais adequadas no uso de recursos educacionais, estudos relacionados a inovações curriculares ou que versam sobre a ação docente. O processo de *design* de um ambiente virtual de aprendizagem para o ensino da medicina e da psicologia foi analisado por Ramos (2010), que estudou um projeto que desenvolveu estratégias pedagógicas para superar problemas do ensino tecnicista da saúde do Instituto de Psiquiatria e da Faculdade de Medicina da UFRJ. Sua pesquisa consistiu em compreender as fases de implementação do projeto, suas particularidades, especificamente, no que diz respeito à dinâmica do trabalho da equipe, e os fatores que influenciaram esse processo. Em outro estudo, Thein et al. (2012) empregaram a metodologia DBR para investigar o ensino de literatura em uma perspectiva multicultural. Os autores consideraram a experiência docente dos professores participantes na definição de princípios de design, e investigaram alguns aspectos relacionados ao desenvolvimento profissional deles. Em um terceiro exemplo, de natureza mais teórica, Wang e Hannafin (2005) buscaram identificar características da DBR que poderiam ser empregadas na pesquisa e no *design* de ambientes de aprendizagem assistidos por tecnologia, definindo alguns princípios para serem explorados.

Especificamente no ensino de ciências, a metodologia DBR gerou uma *linha* de pesquisa que leva em consideração a implementação de inovações curriculares em relação a um conteúdo específico, que ficou conhecida como *Teaching-Learning Sequences* (TLS). Neste trabalho, usamos alguns preceitos desta linha de pesquisa, que descrevemos a seguir.

2.1 Sequências Didáticas: TLS

No contexto do ensino, a DBR tem sido usada para planejar, implementar e avaliar sequências de ensino-aprendizagem (TLS) de conteúdos específicos de ciências. Essa iniciativa partiu de vários pesquisadores educacionais, que argumentam que teorias gerais de educação e aprendizagem não são suficientes para resolver problemas ligados à prática e fazer com que o processo de ensino tenha uma *qualidade didática* melhor (VAN DEN AKKEN, 1999; LIJNSE e KLAASSEN, 2004). Esses autores enfatizam que, tradicionalmente, na pesquisa em educação em ciências não há muita objetividade, a qual permitiria desenvolver conhecimento didático de conteúdos específicos. Eles lamentam a fuga do conteúdo específico e afirmam que, com ela, existe uma dimensão do conhecimento que é ignorada. Esta dimensão que falta é o que poderia descrever e ajudar a entender o que acontece nas aulas de ciências, em termos de interações de conteúdo específico com os processos de ensino-aprendizagem. Seria, segundo estes autores, uma *teoria didática* que ajudaria a interpretar os fenômenos educacionais, promovendo, assim, um *progresso didático* (LIJNSE e KLAASSEN, 2004, p.538).

Para caracterizar a linha de pesquisa TLS, Lijnse (2010) argumenta que num passado distante, os educadores faziam seu ensino usando livros recém escritos por desenvolvedores profissionais de currículos. Estes desenvolvedores, por sua vez, eram inspirados por pesquisadores em educação, que tentavam entender a aprendizagem e o ensino com base em teorias gerais. No entanto, segundo este autor, o sucesso desta estratégia era muito limitado, pois se tentava explicar a instrução de campos específicos, como a Física, em termos de ideias mais gerais, tiradas, por exemplo, de teorias como o construtivismo, a semiótica, a ciência cognitiva e outras. Do ponto de vista da didática, entretanto, essa estratégia prática não seria suficiente, pois existia '*muita teoria e muito pouca ação*', conforme Lijnse (2010) afirma.

De acordo com a linha TLS, entre o nível teórico e a prática propriamente dita existe um nível intermediário não considerado pelos pesquisadores em ensino de física. Em geral, essa dimensão que envolve aspectos e situações reais de sala de aula é deixada para o professor. A pesquisa baseada em *design* aplicada no ensino de física vem a preencher essa lacuna. Lijnse (2010) ilustra esta questão, através de uma figura, que mostramos em 2.1.1. O nível 2 da figura é a lacuna representada pela dimensão didática. Ela envolve um conteúdo específico de uma disciplina e, por isso, possui algumas limitações relativas a ela.

Figura 2.1.1: Dimensões da pesquisa em ensino de física (LIJNSE, 2010, p.145).

A partir dessas ideias, vários pesquisadores europeus têm se dedicado a produzir sequências didáticas, argumentando que o desenvolvimento de atividades direcionadas para a sala de aula de um tema específico é um tipo de *developmental research*, que gera muitos dados de pesquisa. Este processo envolve uma inter-relação de *design*, desenvolvimento e aplicação de sequências sobre um assunto, geralmente durando poucas semanas, num processo cíclico (LIJNSE, 1994, 1995).

O termo 'sequência de ensino-aprendizagem' foi bastante usado no passado em pesquisas de caráter investigativo, acerca da aprendizagem cognitiva de alunos e professores. Contudo, nesta atual linha, o termo TLS é usado para designar uma investigação do ensino proposto e a aprendizagem esperada dos alunos, com a característica de ser uma pesquisa inspirada e orientada por um conteúdo específico (MÉHEUT e PSILLOS, 2004). A TLS é tanto uma atividade de pesquisa intervencionista como um produto, que inclui atividades desenvolvidas de ensino-aprendizagem, empiricamente adaptadas ao raciocínio dos estudantes e a um contexto de sala de aula.

O desenvolvimento de uma TLS leva em consideração aspectos como a concepção dos estudantes, as características restritas do conteúdo específico, suposições epistemológicas, perspectivas de aprendizagem, abordagens pedagógicas e características do contexto educacional. Ao final do processo, espera-se obter dados e resultados que, se analisados, contribuam para um corpo de conhecimento na dimensão didática.

A revista *International Journal of Science Education* (2004, v.26, n.5) dedicou um volume especial às várias publicações sobre pesquisas TLS e, dentre os artigos, alguns autores apresentam a ideia de estrutura didática como um produto das pesquisas aplicadas (PIETROCOLA, 2010). Eles ainda lamentam o número restrito de trabalhos dedicados a

desenvolver conhecimento didático de tópicos específicos e definem a noção de *qualidade didática* dizendo que:

embora conceber a melhor maneira de ensinar um tópico seja uma ilusão, nós acreditamos que alguns caminhos são melhores do que outros; e então seria importante buscar evidências sobre o 'como' e sobre o 'por quê'....(LIJNSE e KLAASSEN, 2004, p. 538, tradução nossa).

• O papel do pesquisador na TLS

Na pesquisa baseada em *design*, o pesquisador é um *participante ativo* do projeto. Ele não é apenas um observador externo mas, o primeiro a moldar seu objeto de estudo de dentro do processo. Ele realiza um experimento de ensino, no qual ele é também responsável pelo *design* didático, pela formação de professores, pelos testes, pela implementação e assim por diante. Como consequência, o principal resultado desta pesquisa é a aprendizagem do conhecimento didático relativo aquele conteúdo específico, alvo de ensino. O pesquisador deve ter conhecimento sobre as abordagens didáticas usuais a respeito daquele tema, sobre a literatura de pesquisa relevante e sobre a teoria que ele quer aplicar. Além disso, ele deve ser capaz de desenvolver e justificar uma nova abordagem didática e, acima de tudo, projetar uma sequência de ensino de tal forma que os professores envolvidos possam colocar essas ideias em prática e estejam dispostos a fazê-lo (LIJNSE, 2010, p.146). Em resumo, o pesquisador tem o papel de gerenciar o processo como um todo, desde a criação de uma ideia inovadora até a sua implementação efetiva no contexto de sala de aula.

No desenvolvimento de uma TLS, o pesquisador leva em consideração os elementos: professor, alunos, mundo material e o conhecimento científico. Méheut e Psillos (2004) propõem um modelo que engloba estes quatro elementos, através de duas dimensões, uma *pedagógica* e outra *epistêmica*, conforme mostramos na figura 2.1.2. Na dimensão epistêmica, eles relacionam os conteúdos a serem aprendidos, os problemas que eles podem resolver e a sua origem histórica. Consideram, ainda, os processos de elaboração, os métodos e a validação do conhecimento científico e sua significação no mundo real. Na dimensão pedagógica, os autores levam em conta os aspectos relacionados ao papel do professor, as interações entre professor-aluno e aluno-aluno, bem como as restrições do próprio funcionamento da instituição de ensino, por meio de programas, cronogramas, dentre outros.

Figura 2.1.2: Losango didático. Adaptado de Méheut e Psillos (2004, p.517).

A perspectiva de Méheut e Psillos se assemelha à relação ternária da didática francesa, proposta por Chevallard e apresentada no capítulo 1.2. Ela considera como elementos principais no processo de ensino o *saber* (S), o *aluno* (A) e o *professor* (P). A relação entre cada um deles, indicada na figura 2.1.3, se dá através das dimensões sociológica, epistemológica e cognitiva, conforme já mencionamos no capítulo 1.2.

Figura 2.1.3: Relação ternária da didática

No losango didático de Méheut e Psillos (2004, p.517) existe um vértice a mais, que corresponde ao mundo material. Esses autores ainda ressaltam que, no processo de *design* de uma TLS, várias questões emergem sobre as situações de ensino-aprendizagem, problemas e atividades. As tomadas de decisão incluem análises do conteúdo, da epistemologia, de concepções e motivações dos estudantes, de teorias de aprendizagem e pedagógicas e de restrições educacionais. Essas questões geram resultados que deverão fazer parte de um conhecimento pertencente à dimensão didática, relativo, portanto, a um conteúdo específico.

Kattmann et al.(1995) associam o desenvolvimento de uma TLS a um modelo de *reconstrução educacional*, que sustenta um processo que ele chama de *elementarização* das ideias centrais do conteúdo a ser ensinado. Para eles, a principal característica da reconstrução educacional é que o conteúdo da ciência deve levar em conta não apenas as dimensões epistêmicas mas, também, o contexto, as aplicações e implicações éticas e sociais. O seu modelo considera a estrutura da ciência com base no significado educacional do conteúdo em questão e os estudos empíricos do processo de aprendizagem dos estudantes, pois as concepções deles são levadas em conta na reconstrução educacional de um conteúdo.

Outra abordagem sobre o *design* de sequências didáticas na pesquisa em ensino é feita por Artigue (1988), que classifica este processo como uma *engenharia didática*. Na sua visão, a autora propõe que o *design* de uma TLS leve em consideração a resolução de problemas, que ela chama de *learning by problem-solving* (aprendizagem por resolução de problemas). Ela ainda sugere que uma análise *a priori* deve ser feita sobre três dimensões: *epistemológica*, sobre o conteúdo a ser ensinado e sua origem histórica; *psico-cognitiva*, sobre as características cognitivas dos estudantes e *didática*, sobre o funcionamento da instituição de ensino.

2.2 Características de uma TLS

O processo de desenvolvimento de uma sequência didática envolve, basicamente, 5 etapas: a *proposição do tema*, o *design*, a *implementação*, a *validação*, a *avaliação* e o *re-design*, todas gerenciadas por um pesquisador em ensino de ciências. Cada uma dessas etapas é discutida a seguir.

1ª) Proposição do tema

A proposição do tema é motivada, em geral, pelo desejo de uma inovação curricular. Essa inovação pode ser tanto em estratégia didática, aprimorando as formas de apresentação de um conteúdo como, também, em conteúdo propriamente dito, inserindo temas que tradicionalmente não são ensinados.

No que diz respeito a inovações de conteúdo, existe uma tendência mundial dos pesquisadores em ensino de física de ampliar estratégias e recursos úteis para a inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no currículo do ensino médio. Na tabela 2.1, apresentamos alguns exemplos de temas de sequências didáticas produzidas pela comunidade

internacional, baseadas na metodologia DBR. Todas essas TLS citadas foram desenvolvidas para estudantes do ensino secundário.

autores/referência	tema	país
Arriassecp e Greca (2012)	Relatividade Especial	Argentina
Buty e Tiberghien (2004)	Óptica	França
Méheut (2004)	Modelo de Partículas	França
Psillos, Tselfes e Kariotoglou (2004)	Flúidos	Grécia
Kabapinar, Leach e Scott (2004)	Solubilidade	Turquia
Komorek e Duit (2004)	Sistemas Não-lineares	Alemanha
Hernández e Pintó (2012)	Propriedade Acústica dos Materiais	Espanha

Tabela 2.1: Outros exemplos de TLS

No caso do Brasil, em particular, essa inovação também é necessária, pois o currículo de física, sugerido pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), abrange, principalmente, conteúdos de física clássica. Por muitas décadas, os professores brasileiros têm ensinado tais conteúdos, o que gera um acúmulo de experiências e resultados didáticos advindos apenas destes temas, por exemplo, de mecânica newtoniana. Com essas vivências repetidas de gerações e gerações de professores, o conhecimento que pertence à dimensão didática, relacionado à prática de ensino de mecânica é bem estabelecido. Assim, encontramos muitos tipos de pesquisas sobre os conteúdos tradicionais, tais como concepções espontâneas, obstáculos epistemológicos, perfil epistemológico, concepções alternativas, dificuldades de aprendizagem, etc. Neste cenário, dificilmente um pesquisador na área de ensino fará uma sequência didática sobre, por exemplo, leis de Newton, já que a motivação e necessidade atuais é para desenvolver um conhecimento didático de conteúdos inovadores.

Na Faculdade de Educação da USP, o NUPIC (Núcleo de Pesquisas em Inovação Curricular) foi criado em 2002 e é composto por pesquisadores, alunos de pós-graduação e de iniciação científica e professores da rede pública de São Paulo. Este grupo vem desenvolvendo sequências de ensino-aprendizagem abordando tópicos de física moderna e contemporânea (FMC) para o ensino médio. Durante essa década de trabalho, houve o amadurecimento do grupo em relação à produção desses materiais didáticos e a metodologia DBR/TLS foi incorporada no planejamento desses cursos. Os trabalhos desenvolvidos

neste período são mostrados na tabela 2.2 e estão disponíveis em www.nupic.fe.usp.br. Atualmente, a meta vai além da produção de materiais. O principal objetivo do grupo está relacionado à pesquisa e ao desenvolvimento de conhecimentos não apenas teóricos, mas relacionados à prática de conteúdos específicos.

autores/referência	tema
Brockington (2005)	Dualidade Onda-partícula
Siqueira (2006)	Partículas Elementares
Brockington, Gurgel e Beig	Fundamentos da Relatividade Restrita
Sousa (2009)	Física das Radiações
Forato (2009)	O Éter, a Luz e a Natureza da Ciência
Pessanha (2014)	Estrutura da Matéria
Nicolau Junior (2014)	Paradoxo dos Gêmeos

Tabela 2.2: Sequências didáticas do NUPIC

2^a) *Design*

O desenvolvimento da TLS é feito nessa etapa que chamamos de *design*. Nela, uma equipe é formada para desenvolver sequências, o que geralmente dura alguns meses. O grupo é composto por professores do nível escolar a que aquela TLS será destinada e é coordenado por um pesquisador, vinculado a uma universidade. Um dos professores participantes do *design* é escolhido para ser o implementador da sequência.

Não existe uma regra específica para a implementação, no entanto, é desejável que o professor implementador participe dessa etapa do processo, pois o *design* é considerado uma preparação para ele. Além disso, é uma oportunidade do professor participar da produção do material, colaborando com ideias e estratégias que ele julgue serem pertinentes àquele contexto. No caso das TLS elaboradas pelo NUPIC, essa etapa envolveu professores da rede pública, juntamente com um pesquisador-coordenador, e a implementação ocorreu nas escolas em que eles lecionavam.

Uma característica importante desta segunda etapa é que ela deve ser norteada por *princípios de design*, estabelecidos anteriormente. Esses princípios funcionam como *pilares teóricos*, hipóteses sobre as quais a TLS se apoia. Eles representam algo já estabelecido, que o pesquisador já conhece. Os princípios podem ter natureza epistemológica, didática

ou experimental. Por exemplo, Hernández e Pintó (2012) desenvolveram uma TLS sobre propriedades acústicas dos materiais e partem de alguns princípios de design, entre os quais podemos destacar: (i) o processo de modelização desempenha um papel central no entendimento da ciência, por relacionar a descrição de objetos e eventos do mundo material para o mundo das teorias e modelos; (ii) a contextualização e a problematização do conteúdo a ser aprendido promove nos alunos uma significação do que é ensinado. Podemos perceber que o primeiro princípio das autoras é de natureza epistemológica e o segundo, didática. Estes princípios, entre outros, guiaram o *design* da TLS desenvolvida e apresentada por elas.

Os princípios de design, por estarem numa dimensão teórica, são muito gerais, não estão relacionados a um conteúdo específico e não estruturam ou ditam formas para que a TLS seja desenvolvida. Por isso, além deles, é necessário também estabelecer *objetivos específicos* que deverão ser cumpridos com aquela proposta de TLS. Estes objetivos se relacionam ao conteúdo, devendo estar presentes no processo de *design*. Eles são os primeiros a dar forma à abordagem daquele conteúdo. Os objetivos específicos podem ser relacionados também às habilidades que se pretende desenvolver com aquela sequência. Em geral, eles são definidos com **verbos** ou **ações** que a TLS deve promover, tais como, por exemplo, **mostrar** como o som se propaga dentro da matéria, **distinguir** as características inercial e gravitacional da massa, **aprofundar** no significado da relação massa-energia, etc.

É interessante notar que objetivos específicos são determinados pelo pesquisador e refletem um desejo que ele tem de inserir/ensinar um aspecto particular daquele conteúdo. Assim, é possível que o mesmo tema e os mesmos princípios de design gerem duas ou mais TLS diferentes, dependendo dos objetivos traçados. Por exemplo, é possível termos duas TLS com os mesmos princípios de design de Hernández e Pintó (2012), citados acima, ambas sobre o tema propriedades acústicas do som, porém, uma com o objetivo de **mostrar** a propagação do som dentro da matéria e outra, de **entender** como se dá a reflexão do som nos materiais.

A proposição do tema, os princípios de design e os objetivos específicos são estabelecidos no início do processo e alimentam a etapa de design, como ilustrado na figura 2.2.1.

Figura 2.2.1: Início do processo de design

Ao final desta etapa, é esperado que o grupo tenha desenvolvido um *produto*, ou seja, um material didático concreto com uma série de instruções para o professor implementador. Este material é considerado um manual para o professor, contendo um roteiro da sequência didática inteira, os objetivos específicos, os conteúdos abordados, as atividades sugeridas para os alunos, outras leituras, gabaritos, etc. Este manual pode, inclusive, ser disponibilizado para que outros professores o utilizem², mesmo não tendo participado do design.

Se a metodologia da TLS parasse nessa etapa, ela seria comparável a uma fábrica de material didático. No entanto, ela é uma metodologia aplicada à pesquisa e, por isso, as outras etapas são essenciais para gerar os resultados advindos do processo e novos conhecimentos pertencentes à dimensão didática.

3ª) Implementação

A etapa seguinte ao *design* é a implementação. Ela se insere no processo de confecção de uma TLS, como representa o esquema da figura 2.2.2.

Figura 2.2.2: Etapas do processo de design

²Isso acontece, por exemplo, com todos os materiais produzidos pelo NUPIC, os quais podem ser acessados em < <http://www.nupic.fe.usp.br>>.

A implementação da sequência produzida deve ser feita por um professor participante da etapa de design. Este aspecto é fundamental para a futura avaliação da TLS. Durante o *design*, o professor implementador se prepara e se apropria das ideias e objetivos da TLS. Ele é um protagonista do processo, que executará parte da inovação proposta e, por isso, deve ser preparado de maneira adequada. Considerando que o professor implementador tenha sido bem preparado e domine o conteúdo, a avaliação do sucesso ou fracasso do processo fica limitado apenas à TLS e das estratégias de ensino incorporadas nela.

Essa terceira etapa é muito importante na TLS, pois ela pode ser a fonte de dados para análise. Por isso, a coleta de dados deve ser planejada adequadamente antes da implementação.

4ª) Validação

As três etapas anteriores são as principais da TLS, pois dão o caráter de pesquisa em ensino da metodologia e estão totalmente relacionadas entre si. Elas são seguidas pela etapa de *validação* da TLS, que é feita com base nos objetivos traçados inicialmente. Sua validação está relacionada à verificação do cumprimento ou não dos objetivos. Van den Akker (1999) define três conceitos como critério de qualidade de uma sequência: a *validade*, a *praticidade* e a *eficácia*. Para ele,

Validade refere-se à medida em que o projeto de intervenção se baseia no conhecimento (estado da arte do conhecimento), e em que vários componentes da intervenção estão constantemente ligados uns aos outros (validade de constructo) e pode adequadamente ser avaliada por peritos em avaliação. *Praticidade* refere-se à medida com que os usuários (e outros especialistas) consideram a intervenção atraente e utilizável para condições "normais". *Eficácia* refere-se à medida em que as experiências e os resultados da intervenção são consistentes com os objetivos pretendidos. (VAN DEN AKKER, 1999, p.10, tradução nossa).

A qualidade de uma sequência depende de uma especificação de objetivos definidos e deve levar em conta uma *coerência interna* entre o *design*, os princípios de *design*, a percepção da equipe, do professor implementador e a atuação dos estudantes, durante a implementação. Esta coerência interna que pode indicar uma qualidade didática da TLS associa-se, para nós, à *intenção didática* incorporada aos princípios de design.

5ª) Avaliação

Nesta etapa do processo os dados coletados anteriormente são analisados. Durante o processo de design é necessária a elaboração de instrumentos de avaliação para serem

aplicados durante a implementação. Eles devem ser criados com base no objetivo principal da TLS, uma vez que a sequência deve ser avaliada em relação a ele.

Méheut e Psillos (2004) sugerem dois tipos de avaliação, uma anterior à implementação e outra, posterior, chamados de avaliação *interna* e *externa*, respectivamente. A eficácia interna da abordagem pode ser determinada pela comparação de resultados obtidos antes e depois da sequência pelos mesmos alunos. A avaliação externa, por outro lado, envolve a comparação dos resultados de um grupo de alunos do mesmo nível que não participou da mesma sequência. O objetivo da avaliação interna é testar a eficácia da sequência em relação aos objetivos iniciais, enquanto que a externa, permite verificar se o trabalho feito em conjunto com os alunos é mais eficiente do que estratégias de ensino alternativas à TLS.

Uma característica importante da metodologia DBR/TLS é que a distingue da pesquisa tradicional é que ela envolve a implementação em um cenário. Ao implementar a sequência de ensino, esse cenário se apresenta como um terreno fértil para a pesquisa, pois é nele que se apoiam as observações e interpretações sobre o processo. É a partir deste contexto que são extraídos os dados de pesquisa. Essa característica pode vir a preencher a dimensão prático-metodológica do ensino de ciências, fazendo a ponte entre a teoria em educação e a sala de aula.

A avaliação de uma sequência de ensino está interligada com seus objetivos iniciais e, principalmente, com uma **questão de pesquisa**. Esta questão deve ser colocada no início do processo e pode tratar de qualquer uma das etapas da TLS e não apenas da aprendizagem dos alunos. Isso significa que uma TLS pode ser desenvolvida com o objetivo de entender aspectos sobre a implementação de um determinado conteúdo, sem se preocupar necessariamente com a aprendizagem dos alunos. Uma TLS com tal objetivo é capaz, por exemplo, de gerar um resultado que avalie métodos e estratégias de ensino de um assunto. Essa TLS se transforma num *produto* que pode ser transferido para outros professores aplicarem em outros contextos e a avaliação e interpretação dos resultados, com base na questão de pesquisa, gera um novo conhecimento didático. Na verdade, é ele que é transferido para outros contextos.

Linjse e Klaassen (2004) desenvolveram uma TLS sobre radioatividade e focaram não apenas no aprendizado dos estudantes, mas também no do professor. Para eles, o caminho conceitual (organização das ideias) juntamente com a motivação para o conteúdo, é refletido e sintetizado na *estrutura didática* de um determinado tópico. Eles argumentam que esta estrutura é um resultado de pesquisa e sua transferibilidade reside no fato de que ela

fornece uma forma de pensar que pode também ser aplicada ao desenvolvimento de uma estrutura similar para o ensino de outros tópicos. Para os autores, um relatório sobre o processo pode ser considerado o principal resultado científico da pesquisa didática, pois ele deveria refletir um progresso no conhecimento didático que seria fundamentado tanto teoricamente, quanto apoiado empiricamente (LINJSE e KLAASSEN, 2004, p.541).

Nicolau Junior(2014) desenvolveu uma TLS sobre o paradoxo dos gêmeos baseada na ideia de *fluxo*. O encadeamento dos conceitos e a inserção das atividades na sua TLS tem a finalidade de permitir que os alunos entendam o enredo global. Para isso, ele elaborou alguns *instrumentos de fluxo*, que foram aplicados ao final de cada atividade da sequência. Essa ideia foi testada no processo de design da sua TLS e se constitui num resultado de pesquisa. Portanto, a *ideia de fluxo* pode ser transferida para outras sequências e contextos, independentemente do fluxo específico do paradoxo dos gêmeos.

6ª) Re-design

Essa última etapa da TLS é chamada de *re-design* e consiste em reprojetar e replanejar a TLS, com base na avaliação feita. Esta etapa depende da avaliação e só pode ser executada após a análise do material coletado durante a implementação. Este material pode ser bastante diversificado, tal como atividades escritas pelos alunos, gravação das aulas, entrevista com os alunos e com o professor, etc.

A avaliação deve ser feita com um foco no sucesso ou fracasso das atividades e estratégias didáticas inseridas na TLS. Após essa análise, as alterações necessárias são realizadas para uma nova implementação. Não é obrigatório que o mesmo professor implemente a TLS em cada edição. Assim, o redesenho incorpora um *manual preventivo*, alertando para as dificuldades e obstáculos que aparecem em sala de aula, tanto em relação ao conteúdo, como em relação à aprendizagem dos alunos.

O processo inteiro DBR/TLS é cíclico, iterativo. O conhecimento didático é gerado por meio de sucessivas aplicações e está vinculado à questão de pesquisa.

* * *

A pesquisa baseada em *design*, descrita anteriormente, constitui uma linha metodológica bastante estudada atualmente. Segundo os autores citados, os resultados obtidos a partir da implementação das TLS, geram conhecimento que compõe uma *teoria didática*. As teorias em educação mais tradicionais tendem a não subsidiar a ação do professor dentro da sala de aula. Daí a necessidade do desenvolvimento de conhecimentos em ensino

que possam ser aplicados no contexto real. O conteúdo científico está aliado a esse conhecimento didático-metodológico. Como o *design* de sequências didáticas em todos os conteúdos parece ser uma tarefa inexequível, recomenda-se o foco em situações de ensino que sejam representativas (TIBERGHIE, 2000). Por fazer uso de características gerais do conhecimento científico, estas situações aumentam a possibilidade dos resultados gerados pela implementação das TLS ser transferível para outros contextos e, principalmente, ser aplicável por outros professores. A questão da transferibilidade é um risco que deve ser considerado com muito cuidado, já que os resultados não são à prova de contexto e de professores. No entanto, eles podem fornecer até mesmo aos professores experientes, novos conhecimentos didáticos para melhorar seu ensino consideravelmente. Esse corpo de conhecimento didático tem um papel importante na atuação do professor, pois ele pode ampliar a consciência das situações e dificuldades relativas ao ensino de determinados conteúdos, coisa que o professor sozinho levaria muitos anos para incorporar à sua prática. Assim, cada novo conhecimento agregado à dimensão didática passa a compor uma espécie de *arsenal* para ser utilizado pelo professor no enfrentamento dos problemas do ensino de uma ciência tão complexa.

2.3 A TLS sob a visão da TD

O desenvolvimento de uma sequência didática se constitui em um processo estratégico-metodológico que pode ser compreendido pelo referencial da teoria da transposição didática (TD) de Chevallard. A TD é usada nesta tese como um referencial amplo, que estabelece as dimensões, hierarquias e diferentes instâncias de problemas educacionais. Consideramos a proposta de Chevallard uma *meta-teoria*, que emoldura o cenário do ensino e permite visualizar o *design* e a *implementação* da TLS sob a sua ótica.

Nesta tese, parte do trabalho consistiu no desenvolvimento de uma sequência didática sobre o conceito de massa, que é descrita em detalhes no capítulo 3. Dela resultou um *produto* na forma de um material didático, que chamamos de *manual de instruções* para a implementação. Este material se insere na esfera do *saber a ensinar* de Chevallard, descrita na seção 1.2. A partir daí, ocorre a transposição *interna*, na qual o professor deveria se apropriar do material didático e transformá-lo em *saber ensinado*. Isto torna o saber disponível dentro da sala de aula, transferido aos alunos, diferente daquele contido nos manuais didáticos. O professor pode e deve interferir no processo e as mudanças que

ocorrem são advindas, principalmente, da sua experiência e da sua individualidade. Por isso, o ambiente da sala de aula é considerado a 3ª esfera do saber, a qual Chevallard chama de *saber ensinado*.

A seguir, discutimos, de um modo genérico, como um produto originado do *design*, se situa nas esferas de saber da TD. Numa situação de inovação curricular de conteúdos, as sequências didáticas construídas nos processos de *design* têm, predominantemente, a intenção de trabalhar com temas que não fazem parte do currículo tradicional, como os de física moderna. A etapa de *design* de uma TLS, pode ser inserida na transposição didática **entre** o *saber a ensinar* e o *saber ensinado*, como mostramos na figura 2.3.1. Isto redefine o papel do professor.

Figura 2.3.1: O *design* inserido na TD

Normalmente, os professores dos ensinos médio e superior usam materiais didáticos e livros-texto escritos por outros autores. Porém, no processo TLS, o professor implementador, que fará a transposição interna, participa ativamente da confecção do material. A etapa de *design* pode ser considerada um período de preparação para este professor. Este procedimento vai na direção do que Davis (2003) sugere, quando enfatiza que os professores deveriam trabalhar no interior dos processos de didatização dos conteúdos escolares, a fim de minimizar problemas, riscos e possibilidades de fracasso na inserção de tópicos inovadores no currículo.

Em geral, a equipe de *design* utiliza diversos materiais didáticos já existentes, como indicamos na figura 2.3.1 (livros-texto, apostilas, anotações de aulas, conhecimentos pessoais dos integrantes do grupo, revistas científicas, etc) e, a reunião de todos eles gera

um material novo. Este processo assemelha-se a uma *bricolagem*³ e origina uma sequência didática própria e personalizada. Após o *design*, a equipe concebe um *produto*: a TLS, que deve ser implementada em sala de aula. A TLS em si pode não ser um material didático conteudista, mas sim, um conjunto de instruções que organiza diversos conteúdos quanto à forma de apresentação, à abordagem e a estratégias didáticas, envolvendo uma série de atividades propostas aos alunos. Nestas instruções podem até existir sugestões de textos de apoio e outras leituras para o professor que irá aplicá-la, pois a TLS é construída baseada numa compilação de materiais didáticos existentes.

• A Intenção Didática

O processo de transposição didática tem sua origem no *saber sábio* e, a partir dele, se inicia o percurso epistemológico dos saberes até chegarem à sala de aula. O esquema completo da TD foi mostrado no capítulo 1.2, bem como o conceito de *intenção didática* (ID), que orienta a transposição inteira, representado por uma flecha na figura 2.4(a). Ela dá coerência ao processo e orienta os objetivos de ensino.

Figura 2.3.2: A Intenção Didática na TD

Cada livro-texto é portador de uma ID, própria do autor e, por isso, eles contemplam facetas do conhecimento físico diferentes, nas suas abordagens. Num processo de ensino, não baseado em *design*, os professores, tanto no ensino médio quanto na graduação, em geral, utilizam os livros didáticos, sem consciência explícita das IDs com as quais eles foram escritos. Mesmo usando material de outros autores, cada professor também tem uma ID particular. Talvez, isto explique a insatisfação que muitos professores sentem quando não

³Em antropologia, *bricolagem* é a união de vários elementos para formação de um único e individualizado. Um exemplo são as culturas do novo mundo: a bricolagem de várias culturas (norte-americana, européia, asiática...) para a formação de uma própria.

encontram livros didáticos que se adequam integralmente às suas concepções de ensino. Representamos a existência dessas duas IDs na figura 2.4(b).

Dada a multiplicidade dos fatores envolvidos na transposição didática, é difícil imaginar que um processo de ensino se complete com uma *intenção didática* coerente até o fim. No caso da universidade, isto tem mais chance de acontecer, já que não é raro que autores de livros, ligados à pesquisa acadêmica, representantes do *saber sábio*, produzam materiais didáticos e eles próprios os utilizem. Nestes casos, acontece a transposição interna dentro da sala de aula e a ID é preservada. Esta situação que pode ocorrer no nível universitário, parece ser impossível na escola. No caso da educação básica, a *intenção didática* é muito mais vulnerável aos fatores advindos da noosfera como, por exemplo, projetos e propostas pedagógicas institucionais ou das escolas.

• A Intenção Didática e as TLS

O processo de desenvolvimento de uma TLS localiza-se **entre** o *saber a ensinar* e o *saber ensinado* da transposição didática, como mostramos na figura 2.3.1. Introduzindo o conceito de *intenção didática*, temos a figura 2.3.3, apresentada a seguir.

Figura 2.3.3: A ID no *design*

No processo de ensino sem *design*, o trabalho do professor é solitário, pois ele não tem muitas oportunidades de discutir as abordagens didáticas daqueles conteúdos num ambiente com seus pares. Isso faz com que a sua prática de ensino seja dependente das IDs dos livros-texto e o espaço para a intervenção pessoal seja pequeno.

No processo TLS, a equipe também utiliza livros-texto de outros autores, com suas próprias IDs, entretanto, o *design* recorre a diversos outros materiais de apoio. Nesse processo, o professor está inserido num grupo de pesquisa, o que pressupõe um tempo para participar de reuniões e discussões. No *design*, a ID é trabalhada conscientemente pela equipe que confecciona a TLS e o professor aplicador participa ativamente da sua construção e da produção do manual de instruções. Nesta situação, ele é mais bem preparado de forma a tomar consciência da ID daquela TLS específica.

2.4 A Nossa TLS e Questões de Pesquisa

Neste trabalho, desenvolvemos uma TLS sobre o conceito de massa, empregando a metodologia DBR. Como discutido nas seções anteriores, todo processo TLS envolve uma equipe e, na nossa TLS, esta equipe foi composta por dois professores colaboradores e um físico do IFUSP, que trabalha na área de hádrons, sob a minha coordenação. Entretanto, o nosso processo introduz uma novidade, que consideramos importante. Antes de iniciar o *design* e a equipe ser formada, eu já havia escrito, juntamente com o docente do IFUSP, um material⁴ intitulado '*Massa: o Conceito de Newton a Higgs*', descrevendo a evolução do conceito de massa nos cenários da mecânica, do eletromagnetismo e da relatividade, discutidos na seção 1.3. O fato deste material ter sido feito em colaboração com um físico atuante da universidade, projeta nele características que o aproximam do saber acadêmico. Foi a partir deste texto que a nossa TLS foi confeccionada e, por isso, a sua *intenção didática* nasceu anteriormente ao *saber a ensinar*, como ilustrado na figura 2.4.1.

Discutimos, anteriormente, que, independentemente de o ensino envolver *design* ou não, a transposição interna se apóia em materiais portadores de IDs de outros autores. No nosso caso, trabalhamos na TD desde a transposição externa, pois o texto escrito por nós foi elaborado com elementos da primeira esfera do saber. Com este material, iniciamos a etapa seguinte, a de *design*, tendo ele como **única** fonte do *saber a ensinar*. Isto permitiu que a ID inicial estivesse presente em todas as fases do processo, sendo preservada até o fim do *design*. Esta ID se manifesta, também, no *manual de instruções* elaborado para a implementação, que está anexado no apêndice A. Ao final do processo, voltamos a ter

⁴Este texto é uma apostila escrita com os conteúdos abordados no curso de extensão, que oferecemos para professores, em janeiro de 2013 e 2014.

reuniões de revisão, com o mesmo físico que colaborou na confecção do texto, de forma a garantir a continuidade da ID, desde o *saber sábio* até o fim do *design*.

Figura 2.4.1: Transposição didática e o nosso processo *design*

* * *

Uma característica importante da TLS é a criação do ambiente necessário para o desenvolvimento de pesquisas. A questão de fundo que norteia a pesquisa é vinculada a este contexto. A TLS desenvolvida neste trabalho está inserida no âmbito da inovação curricular e ela foi instrumento para a criação de um ambiente de sala de aula, onde um professor, o implementador, pôde vivenciar a prática de ensinar conteúdos de física moderna.

Atualmente, já existem várias pesquisas envolvendo sequências didáticas, com foco principal na investigação da aprendizagem dos alunos. O intuito do desenvolvimento da nossa TLS não foi a análise do aprendizado dos alunos, mas sim, a atuação do professor implementador. Por isso, não houve a preocupação de elaborarmos instrumentos para avaliar a aprendizagem dos alunos e a eficácia (validade) da TLS propriamente dita. Paralelamente à aprendizagem dos alunos, é importante também compreender como se dá a atuação do professor. Em situações de inovação curricular, a formação do professor torna-se, especialmente, relevante, pois a apropriação dos conteúdos de física moderna é parte importante do processo. Na nossa pesquisa, usamos a metodologia DBR/TLS para investigar questões relacionadas à prática docente de conteúdos inovadores.

A *intenção didática* que norteou a confecção do material escrito e, posteriormente, o desenvolvimento da TLS, esteve presente até o fim do *design*, manifestada no *manual de instruções*. O elo seguinte do processo, envolve o professor, que deve carregar a *intenção*

didática e transmitir o saber dentro da sala de aula. As questões de pesquisa que emergiram na tese estão centradas em aspectos da prática do professor implementador e, portanto, localizadas na etapa de *implementação* da TLS. Elas dizem respeito à apropriação e à realização da ID pelo professor em sala de aula. Nosso interesse é verificar a existência de possíveis quebras no fluxo da ID e suas eventuais causas. Deste modo, nossa investigação está na esfera do *saber ensinado* da transposição didática, como mostramos na figura 2.4.2.

Figura 2.4.2: Interrupção da ID

Diante das características do conhecimento científico e da sua natureza estrutural, o ensino de conteúdos inovadores, como é o caso da relatividade restrita, requer habilidades diferentes das necessárias para os conteúdos clássicos. Estas habilidades estão diretamente relacionadas à ID da nossa TLS e à efetividade da implementação. Para guiar nossa investigação visando saber se esta ID chegou, de fato, à sala de aula, pensamos em três questões:

- (i) O processo de design é suficiente para preparar o professor implementador para ensinar conteúdos inovadores?
- (ii) Qual a influência ou papel da experiência do professor na apropriação da ID de uma TLS?
- (iii) Quais devem ser as habilidades de um professor para ensinar física moderna?

Um aspecto complementar da TLS é produzir materiais didáticos, que poderiam, em princípio, ser transferidos para outros contextos e usados por outros professores. Diante desta possibilidade de transferência da TLS, é importante saber se a *intenção didática* pode

ser integralmente transferida ao professor aplicador. Por isso, as duas primeiras questões estão relacionadas à *transferibilidade* das sequências. Este problema envolve aspectos relacionados com o *sistema de ensino*⁵ como um todo e não apenas a inovação de conteúdo. Quanto maior o grau de inovação que um material didático traz, maior é o número de problemas sobre o seu uso e sobre a transferibilidade deste material. Em geral, as propostas inovadoras estão voltadas para mudanças que refletem diretamente dentro da sala de aula. Nesse processo, o professor é o elemento mais sensível e afetado com iniciativas inovadoras, pois elas modificam substancialmente a sua rotina.

Com estas questões, queremos entender a importância da experiência do professor em contexto de inovação curricular, levando em consideração a sua formação e sua bagagem prévia de conhecimentos específicos, de conteúdo, epistemológicos, pedagógicos e didáticos. Esta bagagem representa uma espécie de *lastro* e, nesta pesquisa, investigamos *o papel do lastro do professor em situações de inovação curricular*.

A terceira questão abrange aspectos relativos à prática do professor e aos *saberes docentes* que ele adquire durante sua vida profissional. Vários autores têm se preocupado com a formação docente, apontando que os professores se utilizam, em sala de aula, de diversos conhecimentos adquiridos ao longo de sua carreira (SHULMAN, 1986; PERRENOUD, 1993; GAUTHIER, 1998; MEIRIEU, 1998 e TARDIF, 2002). Tardif (2002) define o saber docente ” (...) como um saber plural, formado pelo amálgama, mais ou menos coerente, de saberes oriundos da formação profissional e de saberes disciplinares, curriculares e experienciais” (TARDIF, 2002, p.36). Segundo este autor, os saberes dos professores são temporais, personalizados e situados, variados e heterogêneos, os quais ele resume na tabela 2.4.3, a seguir. Neste quadro, podemos perceber que Tardif não explicita **qual é** o saber docente, mas sim **de onde** ele vem. Por isso, eles são gerais e sem especificidades relacionadas a conteúdos disciplinares.

Siqueira (2012) e Shinomiya (2013) analisaram a atuação de professores em contextos de inserção de física moderna, baseada nos saberes docentes. Seus trabalhos foram feitos com professores de física da rede pública do estado de São Paulo, que participaram do grupo de pesquisa do NUPIC, desenvolvendo e implementando sequências didáticas. Siqueira (2012) levantou os obstáculos que os professores tiveram durante a implementação das sequências e relacionou os saberes desenvolvidos por eles na superação desses obstáculos. Segundo sua

⁵Estamos usando o termo ”sistema de ensino” na concepção mais ampla possível, conforme Chevallard (1991) menciona: a estrutura inteira da transposição, que é influenciada por aspectos externos da noosfera.

pesquisa, estes obstáculos foram relacionados a *falta de domínio do conteúdo, metodologia tradicional de ensino, organização rígida das atividades, avaliação e currículo tradicionais* (SIQUEIRA, 2012, p.172).

SABERES DOS PROFESSORES	FONTES SOCIAIS DE AQUISIÇÃO	MODOS DE INTEGRAÇÃO NO TRABALHO DOCENTES
Saberes pessoais dos professores	A família, o ambiente de vida, a educação no sentido lato, etc.	Pela história de vida e pela socialização primária
Saberes provenientes da formação escolar anterior	A escola primária e secundária, os estudos pré-secundários não especializados, etc.	Pela formação e pela socialização pré-profissionais
Saberes provenientes da formação profissional para o magistério	Os estabelecimentos de formação de professores, os estágios, os cursos de reciclagem, etc.	Pela formação e pela socialização profissionais nas instituições de formação de professores.
Saberes provenientes dos programas e livros didáticos usados no trabalho	A utilização das “ferramentas” dos professores: programas, livros didáticos, cadernos de exercícios, fichas, etc.	Pela utilização das “ferramentas” de trabalho, sua adaptação às tarefas.
Saberes provenientes de sua própria experiência na profissão, na sala de aula e na escola	A prática do ofício na escola e na sala de aula, a experiência dos pares, etc.	Pela prática do trabalho e pela socialização profissional.

Figura 2.4.3: Os saberes dos professores (TARDIF, 2002, p.63)

O trabalho de Shinomiya (2013) determinou cinco categorias de saberes que deveriam ser incorporados no processo de formação de professores: *saber transpor os conteúdos específicos para a sala de aula, saber utilizar os recursos didáticos audiovisuais, saber organizar e planejar atividades didáticas, saber construir os mecanismos de avaliação e saber gerir a sala de aula* (SHINOMIYA, 2013, p.146).

Nosso trabalho foi baseado na investigação do desempenho do professor, sobre as habilidades requeridas específicas do conteúdo para a implementação da sequência didática, e não gerais como propõe Tardif. Por isso, as nossas questões de pesquisa estão relacionadas a um caso particular de ensino da física, envolvendo especificamente o conceito de massa. Elencamos, a seguir, algumas características da nossa tese, que dizem respeito à sequência didática desenvolvida, ao contexto de implementação e à análise dos dados.

- a organização do conteúdo da sequência didática fez parte da pesquisa;
- os processos de *design* e implementação foram levados em consideração na análise;
- a sequência contempla conteúdos de física clássica e moderna;
- a sequência desenvolvida é voltada para professores de ensino médio e tem uma aborda-

gem no nível universitário;

- a questão investigada sobre a atuação do professor envolve conteúdo e, portanto, diz respeito aos saberes específicos necessários para o ensino de relatividade restrita;

Estes aspectos tornam essa pesquisa ampla e inédita, pois analisamos a atuação do **mesmo** professor no ensino da física clássica e da moderna. A sequência que desenvolvemos tem aulas de mecânica, de eletromagnetismo e de relatividade e, partimos da hipótese de que as habilidades exigidas para o ensino de cada conteúdo são diferentes. Assim, analisamos o desempenho do **mesmo** professor em diferentes contextos, criando situações em que podemos comparar aspectos de sua formação relativos aos conteúdos considerados tradicionais e aos modernos.

Capítulo 3

Uma Proposta de TLS - $E = mc^2$ e o Peso da Energia

O meu trabalho de pesquisa trata do ensino em nível superior, de um conteúdo específico, o conceito de massa. No capítulo 1, examinamos a formação de professores da licenciatura no Instituto de Física da USP e discutimos sobre os aspectos epistemológicos e estruturais da massa e da energia. No capítulo 2, descrevemos a metodologia DBR/TLS, de forma geral, enfatizando suas principais características e etapas. No presente capítulo, incorporamos a organização dos conceitos físicos à DBR e descrevemos a elaboração de uma sequência didática.

3.1 Planejamento do Curso

A primeira versão, o curso piloto, se chamou '*Massa: o conceito de Newton a Higgs*', que é o mesmo título do material já mencionado no capítulo anterior, escrito em colaboração com um professor *especialista* que trabalha na área física de hádrons. A partir de agora, este texto passará a ser chamado de *apostila de apoio*. O curso foi aplicado por mim em janeiro de 2013, com duração de uma semana (30 horas). Ele fez parte do 5º Encontro USP-Escola, no Instituto de Física da USP, campus de São Paulo, no qual foram oferecidos cursos de extensão a professores do ensino médio. Em particular, o curso que eu ministrei contou com a participação de 33 professores, dentre os quais, alguns também ensinavam em faculdades.

O curso trata do papel da massa nos cenários da mecânica, do eletromagnetismo e da

relatividade. Ele foi desenvolvido considerando os aspectos epistemológicos e estruturais dos conceitos da física, apresentados no capítulo 1.3. Este piloto foi baseado em aulas expositivas, com a intenção de averiguar a adequação do conteúdo ao tempo e, também, a do nível de profundidade de cada tema. Como os alunos que o frequentaram eram professores do ensino médio já licenciados, nossa abordagem foi em nível universitário.

A equipe da nossa TLS foi formada a partir da experiência do curso piloto. Durante aquela semana alguns alunos-professores se destacaram pelo interesse no tema, pela participação e pelo entendimento das aulas. Pudemos perceber pelos seus questionamentos e conversas informais durante o curso, o potencial favorável à participação do nosso projeto. Após o término do curso, convidamos quatro alunos, dos quais, dois aceitaram a proposta de participar da equipe que desenvolveria a sequência didática, para ser implementada posteriormente. Meu convite para ser o professor aplicador da sequência didática foi explícito para apenas um deles. Este professor, que aceitou prontamente, tem grande experiência em sala de aula, tanto no nível médio quanto no superior, em disciplinas de física para cursos de engenharia. Além disso, ele possui um mestrado na área de filosofia da ciência.

A equipe de *design* foi composta por três pessoas, sob a minha coordenação: (a) o colaborador-implementador, (b) outro colaborador e (c) o especialista, docente do IFUSP. Meu papel foi de gerenciar o processo e garantir o cumprimento de três tipos de tarefa, de natureza:

- (i) **conceitual** - garantir a intenção didática da TLS;
- (ii) **burocrática** - tratar com o departamento de extensão do IFUSP o oferecimento do curso e
- (iii) **logística** - tratar do cronograma de reuniões de design.

A proposta da TLS é desenvolver em conjunto com a equipe formada, uma sequência didática seguindo os preceitos da pesquisa baseada em *design*. A *apostila de apoio*, que já existia, se localiza na esfera do *saber a ensinar* da TD, que antecede a etapa efetiva do *design*. No nosso processo, esta etapa partiu desta *apostila* e as estratégias e atividades para garantir a continuidade da *intenção didática* nela presente, teriam que ser construídas em equipe. Assim, confeccionamos, juntamente com a equipe, um caderno extra, que chamamos de '*Manual de Instruções*' para o professor, descrevendo o objetivo, o conteúdo, os pré-requisitos, os recursos e as atividades de cada aula. Este manual completo está anexado no apêndice A.

• Os Princípios de Design

Na metodologia DBR/TLS, os *princípios de design* tem um status elevado e geral. No nosso caso, eles estão relacionados à estrutura do conhecimento científico e, tem, portanto, natureza epistemológica. Partimos do *princípio* que:

(a) *Os conceitos da ciência evoluem e mudam de significado ao longo do tempo* - este princípio dialoga com a noção de *perfil epistemológico*, de Bachelard e, também, com a ideia da **re-significação** da massa.

(b) *Mapas e redes são fundamentais para o entendimento de um conceito* - este princípio está relacionado ao fato de o conhecimento científico se organizar em estruturas conceituais e de a **significação** de um conceito ser dada pelas suas vizinhanças.

Estes princípios caracterizam o conhecimento científico e foram incorporados, de maneira intensional, na apresentação dos três cenários para a massa do capítulo 1.3.

• Os Objetivos do Curso

Os objetivos do curso são bastante amplos e fazem parte de uma dimensão mais concreta, que orientou o *design* do curso. Eles estiveram presentes durante todo o processo, norteando a construção da sequência.

- **objetivo principal:** mostrar as mudanças no conceito de massa, ao longo do desenvolvimento da física, desde a concepção newtoniana, até a da relatividade.

- **objetivos secundários:** incorporar aspectos específicos de natureza conceitual, epistemológica e curricular, relacionados ao cumprimento do objetivo principal. Por isso, estão numa dimensão mais metodológica e consistem em:

1) mostrar que a fórmula $E = mc^2$ é muito mais do que aquela primeira abordagem da ideia de conversão massa em energia - *de natureza conceitual*;

2) mostrar que o conceito de massa só pode ser entendido através de uma estrutura conceitual que é construída e desconstruída ao longo da evolução da física (aqui nos utilizamos das ideias de mapas conceituais, relações entre conceitos e perfil epistemológico) - *de natureza epistemológica*;

3) mostrar que os fragmentos de $E = mc^2$ existentes nos livros-texto, nos currículos e nas ementas são insuficientes para um aprofundamento do tema - *de natureza curricular*.

• As reuniões de design

Durante o ano de 2013, foram feitas 12 reuniões pela equipe de *design*, que se estenderam por, aproximadamente, 4 meses. Ao final do processo, tivemos a participação do professor *especialista* do IFUSP em três das reuniões, para que a revisão final das atividades fosse feita. Todas as reuniões foram gravadas em audio e cada uma delas durou entre 2 e 4 horas. A seguir, apresentamos a tabela com as datas das reuniões, os temas que foram tratados, duração e os participantes.

reunião	data	aula	duração	equipe
1 ^a	13/05/13	1	2h03'39"	1 coord. + 2 colab.
2 ^a	20/05/13	1	2h56'52"	1 coord. + 2 colab.
3 ^a	27/05/13	2	2h46'06"	1 coord. + 2 colab.
4 ^a	05/06/13	2	1h41'04"	1 coord. + 2 colab.
5 ^a	10/06/13	3	2h49'02"	1 coord. + 2 colab.
6 ^a	17/05/13	3	2h03'33"	1 coord. + 2 colab.
7 ^a	03/07/13	4	3h03'28"	1 coord. + 2 colab.
8 ^a	14/08/13	5	2h15'48"	1 coord. + 2 colab.
9 ^a	26/08/13	Revisão	2h41'37"	1 coord. + 2 colab. + 1 espec.
10 ^a	04/09/13	Revisão	3h48'36"	1 coord. + 2 colab. + 1 espec.
11 ^a	11/09/13	6	2h14'14"	1 coord. + 2 colab.
12 ^a	16/09/13	6 e 7	2h56'11"	1 coord. + 2 colab. + 1 espec.

Tabela 3.1: Reuniões de *design*

Após todas as reuniões, definimos o nome do curso como sendo '*E = mc^2 e o Peso da Energia*'. Além disso, acordamos os seguintes detalhes:

★ o curso seria voltado para professores de física do ensino médio e alunos do último ano da licenciatura - a ideia central era preparar os participantes para discussões epistemológicas e introduzir conteúdos de física moderna que não são abordados na graduação.

★ *as aulas seriam dadas em quatro semanas, aos sábados* - consideramos que os professores atuantes não teriam disponibilidade durante a semana.

★ *haveriam tarefas para casa entre uma semana e outra* - nesse intervalo, seriam possíveis reflexões e sedimentação do que foi dado; as tarefas tiveram dois objetivos: complementar o conteúdo da aula dada e preparar para a aula seguinte.

★ *a programação do curso e o título das aulas não seriam divulgados* - optamos por não divulgar a ementa, pois o curso envolve um encadeamento de ideias e elementos 'surpresa', colocados com a função de criar momentos de reflexão e *estruturação cognitiva*.

★ *a apostila de apoio só seria distribuída no final do curso* - como o conteúdo do curso é muito extenso e inédito, decidimos entregar este texto para todos os professores participantes; isto foi feito somente na última aula, pelas razões expostas no item anterior.

• O programa do curso

O curso que desenvolvemos foi oferecido pelo departamento de Cultura e Extensão do IFUSP, num programa de atualização de professores. As aulas, seus títulos e as datas constam na tabela abaixo.

hora	14/09/13	21/09/13	28/09/13	05/10/13
8:00 - 10:00	Aula 0	Aula 2	Aula 4	Aula 6
10:00 - 10:30	café	café	café	café
10:30 - 12:30	Aula 1	Aula 3	Aula 5	Aula 7

Título das Aulas

Aula 0 - Universo Físico Clássico

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica

Aula 2 - Sistemas Ligados e o Átomo de Hidrogênio

Aula 3 - Energia e Momento no Eletromagnetismo

Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação

Aula 5 - Relatividade: absolutos e relativos

Aula 6 - Relatividade: massa e energia

Aula 7 - $E = mc^2$ em ação...

6^a Encontro USP-Escola
cursos de extensão gratuitos para atualização de professores do ensino básico

Curso de Atualização
 $E=mc^2$ e o Peso da Energia

Ministrantes:

De 14/set a 19/out
Aos sábados, das 08h às 12h30 (30 horas)

- 14/set
- 21/set
- 28/set
- 05/out
- 19/out

Vagas limitadas!
Inscrições até **30/ago**

Público alvo:

- ✓ Professores do ensino médio
- ✓ Alunos do último ano da licenciatura em física

Informações e inscrições: <http://web.if.usp.br/extensao> - e-mail: ccultext@if.usp.br

Apoio: Pró-Reitoria de Cultura e Extensão da USP – Diretoria do IFUSP – - CAPES

3.2 Funcionalidade: Meios e Fins

O curso tem uma narrativa, uma narrativa didática, que transmite uma mensagem. Tal como o enredo de um filme, existem nele acontecimentos dispostos temporalmente, encadeados segundo uma lógica, que transmitem uma mensagem e tem um sentido. A estrutura do curso assemelha-se, portanto, a um *roteiro* de um filme e o seu diretor espera que a platéia, ao final, entenda a 'moral da história'. Analogamente, cada uma das 8 aulas do curso foi planejada de modo a fornecer elementos de conteúdo, que devidamente encadeados, propiciem a re-significação da massa.

O curso, tal como uma viagem de ônibus, tem um destino que, no nosso caso, seria mostrar a mudança de um conceito da física. Se a viagem for muito longa, são necessárias algumas paradas intermediárias. Nesses momentos, os passageiros descem, esticam as pernas, comem... Elas são importantes, pois revigoram e descansam os viajantes, reconstituindo a disposição inicial para a viagem, o que é bom para a próxima etapa. Elas permitem uma refocalização do propósito principal do trajeto e, por isso, tem funções técnicas e estratégicas. A parada não é o destino final. O motorista do ônibus, consciente do destino da viagem, sabe aonde ele deve chegar e tem o papel de conduzir todos para lá.

Caso algum passageiro queira, por exemplo, ficar mais tempo ou se perder nas paradas, o motorista deve lembrá-lo de voltar para o ônibus, pois a viagem precisa continuar. Nessa analogia, as paradas são necessárias e podem ser consideradas elementos **tipo meio** para atingir o objetivo. Por outro lado, o ato de andar na estrada é um elemento **tipo fim**, pois conduz ao destino. **Fins** e **meios** são elementos que estão em dimensões diferentes, como mostramos na figura 3.2.1.

O nosso curso foi construído levando em conta o destino a que se queria chegar. Para o cumprimento do seu propósito, cada aula possui elementos 'tipo meio' e 'tipo fim'. Os elementos classificados como **meio** são conteúdos que, em geral, não fazem parte do eixo principal do curso. Eles podem ter relação com os conceitos apresentados, suprimindo possíveis lacunas de conteúdo. Podem, também, ser considerados pré-requisitos para o entendimento de um assunto que será abordado posteriormente. Por isso, os elementos tipo **meio** tem uma função estratégica **local** no curso.

Figura 3.2.1: Elementos 'fim' e 'meio' do curso

Por outro lado, os elementos classificados como **fim** são conteúdos e abordagens consideradas fundamentais para o entendimento **global** do tema. Eles constróem o eixo principal da narrativa didática e trabalham dois aspectos complementares do conhecimento, a *extensão* e a *profundidade* (KNEUBIL e ROBILOTTA¹, 2014) de alguns conceitos da física, tais como momento, inércia, ação e reação, massa, etc. Os tópicos considerados **fim** têm a função de inserir estes conceitos em contextos mais amplos, na dimensão da *extensão*. Além disso, em determinadas aulas, temos também a intenção de explicitar conteúdos

¹Physics Teaching: Mathematics as an Epistemological Tool. Artigo aceito para publicação na revista Science & Education.

ontológicos, na dimensão da *profundidade*. Essas passagens, consideradas **fim**, criam momentos que estruturam o conhecimento e fecundam o conteúdo com epistemologia. Quando isto acontece, uma integração maior é sentida e apreendida intelectualmente, numa camada mais profunda da nossa cognição. Ocorrem, então, as desejadas reestruturações e o nexa global do todo passa a ter **significado**.

A inserção de elementos **tipo fim** em cursos de física é importante para, entre outras coisas, torná-los menos áridos, técnicos e carregados de formalismo matemático. Esses elementos têm um função cognitiva e pedagógica, pois propiciam uma espécie de reconexão com a *Grande Ciência*, dando uma injeção de ânimo e mantendo o aluno 'vivo' até o fim do curso. No nosso caso, esses momentos foram criados propositadamente na sequenciação das ideias. A funcionalidade dos tópicos do nosso curso está sintetizada na tabela 3.2.

elementos	ação	função
MEIOS	local	suprir lacunas e/ou revisar conteúdo
FINS	global	estruturar conhecimento e dar significado

Tabela 3.2: elementos fim e meio

Em todas as aulas apresentamos conteúdos considerados **meio** e **fim** e, o que distingue uns dos outros é a *intenção didática* e a maneira com a qual o professor trata cada um deles. Por exemplo, numa determinada aula mencionamos um capacitor e calculamos a energia que ele acumula. A intenção do curso não é dar uma aula sobre capacitores e nem, tampouco, discorrer sobre a densidade de energia eletromagnética. Mas existe uma razão, uma *intenção didática*, para colocar o assunto 'capacitor' num ponto estratégico do nosso curso sobre massa. A ideia é mostrar como o conceito de energia está associado aos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$, diferentemente da energia na mecânica newtoniana, que é sempre vinculada à massa. Assim, o conteúdo 'capacitor' é considerado elemento **tipo meio** no curso.

Todos os conteúdos inseridos nas aulas são encadeados com uma dada finalidade. O curso tem um caráter teleológico², pois houve a preocupação em ordenar as ideias em diferentes momentos e passagens, para que a mudança conceitual da massa pudesse ser percebida.

Existem três noções de tempo neste curso, dependendo do contexto considerado: o

² *Teleologia* é a ciência das causas finais (Priberam, dicionário).

tempo lógico, relacionado com o encadeamento das ideias e com a narrativa didática, o *tempo pedagógico*, relacionado à adequação do tempo lógico à aula efetiva, dependente do público e da interação professor-aluno e o *tempo cronológico*, que é aquele proposto, de 16 horas, para a duração do curso.

Com a noção dos três tempos, a consciência da teleologia do curso e o entendimento da narrativa didática, pudemos planejar cada aula, definindo os conteúdos e classificando-os quanto ao seu tipo de funcionalidade. Este planejamento se materializou nas ações propostas no *manual de instruções*, apresentado no apêndice A. A explicitação das IDs de cada aula foi feita posteriormente, e está descrita na próxima seção.

3.3 Explicitação das IDs das Aulas

Um característica original desse curso é que ele é baseado em vários esquemas e transita de um para outro, enfatizando e reforçando as mudanças que ocorrem entre os conceitos da física. Consideramos três grandes blocos: a mecânica newtoniana, o eletromagnetismo e a relatividade.

No programa do curso temos três aulas de mecânica clássica, duas de eletromagnetismo e três de relatividade. Descrevemos, a seguir, os conteúdos abordados em cada aula, justificando-os e dando a eles um sentido mais amplo, inserindo-os na lógica da sequência didática. As *intenções didáticas* e o percurso sobre os esquemas conceituais das aulas são descritos nesta seção.

Aula 0 - Universo Físico Clássico

• Descrição da Aula

Esta aula é a primeira do curso e foi baseada em um esquema conceitual da mecânica que construímos, mas não apresentado no capítulo 2. Este esquema, mostrado na figura abaixo, traz uma organização das ideias sem o conceito de **energia**. O intuito desta aula é apresentar vários conceitos da física, para em seguida, na aula 2, introduzir a energia. Os números, entre parênteses, inseridos junto às linhas indicam os caminhos a serem percorridos durante a aula. Isso enfatiza que a aula corresponde a um passeio sobre o esquema, norteado por uma estratégia didática.

A seguir, descrevemos a sequência das principais etapas do nosso passeio pelo esquema.

★ O Universo

Perguntar para os alunos-professores *O que existe no universo?* e preencher a lousa com as palavras ditas por eles. Em seguida, fazer um 'recorte' e considerar apenas as palavras que dizem respeito à física.

★ Espaço e Tempo - caixas (a) e (b)

Diante da quantidade de palavras apresentadas na lousa, iniciar uma categorização das mesmas. Introduzir a analogia da física com uma peça de teatro, com palco, diretor e atores. Apresentar e discutir o *espaço* e *tempo* como pertencentes ao **palco**.

★ Massa e Campo - caixas (c) e (d)

Introduzir a *massa* e o *campo gravitacional* como **atores**.

★ Lei da Gravitação de Newton - caminhos (4), (5) e (6)

Introduzir a lei da gravitação de Newton, que mostra de onde a força provém. Apresentar

esta característica como algo relacionado à propriedade da *atratabilidade* da massa.

★ **2a lei de Newton** - caminhos (1), (2) e (3)

Apresentar a 2ª lei de Newton como **diretor** da peça cósmica. Discutir o papel desta lei na física e mostrar que esta relação explica o que uma força faz, juntando atores com palco.

★ **1a lei de Newton** - caminhos (7), (8), (9) e (10)

Discutir a 1ª lei de Newton, relacionando-a com as propriedades do palco. Introduzir o conceito de *inércia*, movimentos naturais e homogeneidade e isotopia do espaço.

★ **Palco, Atores e Diretor**

Sintetizar toda a discussão, organizando os conceitos vistos e construir o quadro mostrado abaixo.

universo físico clássico			
palco:	espaço	e	tempo
diretor:	leis dinâmicas: $\vec{F} = m\vec{a}$ Ação e Reação		
atores:	matérias e campos		

● **Intenção Didática**

A principal intenção dessa aula é estruturar e espacializar o conhecimento que os alunos já tem, pois não é apresentado nenhum conteúdo novo. Entretanto, seu modo de organização é novo. Explicitar uma hierarquia e uma classificação dos conceitos da física é muito importante. Eles ocupam posições diferentes dentro do corpo de conhecimento, relacionadas às suas funcionalidades e naturezas. Por isso, deixamos explícito os papéis das massas inercial e gravitacional e as leis de Newton. O propósito de estruturar o que os alunos já sabem é evitar a dispersão dos conceitos e permitir um olhar integrado sobre a teoria. A intenção desta organização é criar um quadro que dê significado às mudanças a serem introduzidas nas aulas posteriores.

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica

● **Descrição da Aula**

Essa aula foi baseada no esquema conceitual da mecânica, mostrado na figura 1.3.3 e reproduzido abaixo. Novamente, os números junto às linhas indicam os caminhos percorridos durante o passeio sobre o esquema. Em seguida, listamos os principais tópicos da aula.

★ **Palco, Energia e Momento** - caminhos (1), (2) e (3)

Apresentar o conceito de energia e associá-lo ao tempo. Essa relação se apóia no teorema de Nöether, que atribui a conservação da energia à uniformidade do tempo. De modo análogo, as conservações dos momentos linear e angular estão associadas à homogeneidade e à isotropia do espaço, respectivamente. Em seguida, inserir a *energia* e os momentos linear e angular no quadro do universo físico clássico, mostrado abaixo.

Aula 2 - Sistemas Ligados e o Átomo de Hidrogênio

• Descrição da Aula

Esta aula não tem uma mapa como base, porque ela trata do átomo de hidrogênio como um exemplar de sistema ligado. Toda discussão é feita em cima do conceito de poço de potencial e de reações exotérmicas. Os principais passos da aula estão apresentados abaixo.

★ Bolinha Presa

Discutir o caso de uma bolinha confinada numa região do espaço, por meio de uma caixa, uma corda e uma mola.

★ Poço de Potencial

Redescrever o caso da bolinha presa, numa linguagem mais abstrata, através de gráficos de energia. Em seguida, associar o confinamento da bolinha a poços de potencial.

★ Potencial Coulombiano

Estender a discussão para sistemas presos, confinados pela força elétrica e apresentar o poço de potencial coulombiano.

★ Energias do Átomo

Descrever os estados ligados do átomo, usando a expressão advinda da mecânica quântica.

★ Energia de Ligação

Mostrar que a quebra do átomo corresponde à saída do elétron do poço coulombiano. Em seguida, associar esta quebra ao recebimento de uma quantidade mínima de energia, conhecida como *energia de ligação*.

★ Epistemologia no Átomo

Mostrar que medidas macroscópicas permitem acesso, por meio de modelos, ao conhecimento de entidades microscópicas não diretamente observáveis.

★ Reações Exotérmicas

Mostrar, por meio de gráficos, as reações exotérmicas como processos de fusão, acompa-

nhados necessariamente da emissão de fótons. Interpretar este processo como uma queda do elétron no interior do poço de potencial coulombiano.

• Intenção Didática

A equação $E = mc^2$ é, especialmente, útil na descrição das propriedades de sistemas ligados. Como, em geral, os estudantes de licenciatura e professores do ensino médio não estão familiarizados com a descrição conceitual de sistemas ligados, a intenção desta aula é discutir as energias do átomo de hidrogênio, usando poços de potencial. Isto permite o entendimento do conceito de *energia de ligação*, das reações exotérmicas e da quebra de sistemas que, mais tarde, serão retomados com enfoque relativístico.

Aula 3 - Energia e Momento no Eletromagnetismo

• Descrição da Aula

O esquema conceitual do eletromagnetismo, apresentado no figura 1.3.4 e reproduzido abaixo, serviu como base para esta aula. O nosso percurso sobre o esquema é descrito a seguir.

★ **Cargas e Campos** - caminhos (1) e (2)

Recordar que as cargas e os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são os principais atores do eletromagnetismo e que cargas em repouso e em movimento geram campos elétrico e magnético.

★ **Energia dos Campos** - caminhos (3) e (4)

Associar uma densidade de energia eletromagnética, distribuída no espaço, a partir dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$.

★ **Energia do Capacitor**

Aplicar a expressão da densidade de energia dos campos a um capacitor carregado e mostrar que a sua energia eletrostática é a mesma que a obtida por outros métodos. Em seguida, argumentar que o trabalho necessário para aumentar a distância entre as placas fica acumulado no espaço na forma de energia do campo.

★ **Cargas Puntiformes**

Estender a discussão feita da energia do capacitor para o caso de duas cargas puntiformes em repouso. Aplicar este resultado para distinguir a energia potencial do sistema da auto-energia de cada partícula. O conceito de auto-energia de uma carga antecipa uma aplicação da equação $E = mc^2$.

★ **Ondas Eletromagnéticas** - caminhos (5) e (6)

Descrever as ondas eletromagnéticas como portadoras de energia eletromagnética e associar o vetor de Poynting ao transporte dessa energia.

★ **Momento da Onda** - caminhos (7), (8) e (9)

Recordar a expressão da força de Lorentz, que age sobre cargas, devida à existência dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$. Discutir a incidência de uma onda eletromagnética sobre um corpo e mostrar que ela pode transferir quantidade de movimento a ele.

★ **Re-significação**

Enfatizar que um objeto sem massa pode carregar momento e que a expressão clássica $\vec{p} = m\vec{v}$ não pode ser aplicada ao eletromagnetismo. Isto anuncia a necessidade de uma reconstrução teórica.

- **Intenção Didática**

O eletromagnetismo teve um papel muito importante na transição da mecânica para a relatividade. Por isso, neste curso, são dedicadas duas aulas a esta teoria. A intenção principal desta aula é associar a energia aos campos elétrico e magnético, pois isto permite mostrar que uma onda eletromagnética pode transferir momento a um objeto. A intenção deste exemplo é provocar nos alunos um questionamento: *Como algo sem massa pode transferir momento?!...* Essa discussão prenuncia a dissociação dos conceitos de massa e de inércia. É o início da ruptura.

Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação

- **Descrição da Aula**

Esta segunda aula de eletromagnetismo é uma continuação da anterior e está apoiada no mesmo esquema já apresentado. A ideia principal é reforçar o entendimento dos campos e tratar de um fenômeno particular do eletromagnetismo, a radiação. A sequência de tópicos tratados é apresentada abaixo.

- ★ **Linhas de Campo**

Recordar as linhas do campo elétrico de uma carga parada. Em seguida, mostrar como se modificam estas linhas na situação de uma carga em movimento uniforme.

- ★ **Desaceleração de uma Carga**

Discutir o que ocorre com as linhas de campo numa situação em que uma carga em movimento pára ao bater em um obstáculo. Esta discussão é feita baseada no desenho das linhas do campo $\vec{E}$, que deve ser construído passo a passo. Neste desenho, introduzir as deformações do campo elétrico na região de transição e a *bolha de informação*.

- ★ **Bolha de Informação**

A partir do desenho da bolha de informação, interpretar o significado físico da deformação de $\vec{E}$ na região de transição. Mostrar que a variação de $\vec{E}$, gerando $\vec{B}$, é uma onda eletromagnética. Em seguida, apresentar este fenômeno com um simulador de radiação, chamado *Radiation 2D*.

★ Quebra da 3ª Lei de Newton

Retomar as forças elétricas entre duas cargas puntiformes, mostrando que elas são advindas do campo elétrico e constituem um par ação-reação. Com este exemplo na lousa, transpor a mesma discussão, introduzindo as forças elétricas no desenho da bolha de informação. Mostrar que, para o caso da radiação, as forças elétricas advindas dos campos *não* são paralelas e, por isso, **não** podem constituir um par ação-reação.

★ Conservação do Momento

Discutir a implicação epistemológica da quebra da 3ª lei de Newton. Introduzir a conservação do momento linear como algo mais fundamental que a lei de Newton e mostrar, em seguida, que a radiação garante a conservação do momento.

★ Re-significação

Retomar o exemplo da aula anterior da luz incidindo num corpo e reforçar a situação já discutida com o caso da radiação. Os exemplos dados propiciam o início da desconstrução da massa, através da re-significação do momento.

● Intenção Didática

Esta aula é fundamental no curso, pois fornece elementos para convencer os alunos que a mecânica newtoniana é insuficiente para explicar alguns fenômenos do eletromagnetismo. A intenção é, partindo do caso da radiação, quebrar a 3ª lei de Newton. Consideramos esta quebra um elemento surpresa no curso e um momento muito importante. É uma situação que pode provocar um desconforto intelectual devido à *desestruturação* interior do conhecimento dos alunos. Essa ruptura da visão clássica pode ser 'consertada' com a explicação de que, embora a 3ª lei de Newton não valha mais, a conservação do momento linear é mantida, pois onda eletromagnética carrega momento. Esta sequência de apresentação das ideias é intencional e a estratégia didática foi criada para propiciar um conflito envolvendo o uso do momento $\vec{p}$. No caso da radiação, é mostrado que $\vec{p}$ pode pertencer aos mundos do eletromagnetismo e da mecânica. Este fato induz uma reestruturação do pensamento, pois no início do curso, provavelmente, os alunos achavam que momento era uma grandeza que pertencia apenas à mecânica.

Do ponto de vista estrutural, a discussão do caso da radiação representa uma porta de saída do eletromagnetismo e uma conexão com a mecânica. Nossa intenção é que o pensamento do estudante percorra um **caminho inédito**, partindo do esquema do eletromagnetismo para o da mecânica e, também, que apareçam questionamentos, de natureza epistemológica, sobre momento, energia e massa. Os esquemas se conectam e uma ligação nova aparece, como representamos na figura abaixo.

No cenário da mecânica newtoniana, o momento linear $\vec{p}$ e a inércia são grandezas relacionadas ao movimento dos corpos e à **massa**. No eletromagnetismo, por sua vez, a

discussão feita mostra que ondas eletromagnéticas também tem energia, momento e inércia. Estas ideias estão representadas pelos traços (a) e (b), da figura acima, onde os conceitos são ligados sem passar pela massa.

Em resumo, a intenção desta aula é provocar uma reflexão acerca de duas questões muito importantes sobre *massa* e *energia*: (i) qual seria a relação entre elas? (ii) como reorganizar o quadro do universo físico clássico com os novos elementos advindos do eletromagnetismo? A resposta a estes questionamentos é construída lentamente nas aulas seguintes com a relatividade restrita. Por isso, a aula 4 é essencial para a narrativa didática deste curso, pois ela gera uma desestruturação conceitual, o que obriga os alunos estabelecerem **novos significados**, que, posteriormente, podem atingir uma nova situação de estabilidade na estrutura do conhecimento.

Aula 5 - Relatividade: absolutos e relativos

• Descrição da Aula

Esta primeira aula de relatividade está baseada no esquema conceitual apresentado na figura 1.3.5. Percorremos, inicialmente, apenas uma parte do esquema e, por isso, somente ela está reproduzida abaixo. Esta aula envolve os temas mostrados a seguir.

★ Relatividade por Rotações

Discutir a relatividade por rotações, de caráter geométrico, mostrando que a noção de referencial sempre aparece na descrição dos objetos. Apresentar casos das geometrias euclidiana e analítica, com o exemplo de um cubo, no qual as coordenadas dos vértices são descritas de maneira diferente em cada referencial.

★ Relatividade Restrita - caminhos (1) e (2)

Apresentar a relatividade de Einstein como uma teoria análoga à geométrica e mostrar que a principal diferença entre elas é o movimento dos referenciais e a coordenada temporal. Em seguida, enunciar os postulados básicos da relatividade e enfatizar que a velocidade da luz c é um invariante relativístico.

★ Transformações de Lorentz e Absolutos - caminhos (3), (4) e (5)

Mostrar que em ambas as relatividades (geométrica e restrita) existem grandezas invariantes por mudanças de referencial. Apresentar o *evento* como algo absoluto na relatividade restrita e, em seguida, introduzir as transformações de Lorentz como o conjunto de equações que permite relacionar as coordenadas de um mesmo evento em dois referenciais diferentes.

★ Produto Escalar

Discutir o significado do produto escalar, primeiramente, na relatividade geométrica. Transportar este conceito para um espaço quadrimensional e redefiní-lo na relatividade restrita.

★ Intervalo Relativístico - caminhos (6), (7) e (8)

Usar a definição do produto escalar da relatividade e mostrar que a *quadridistância* entre dois eventos é um invariante relativístico. Dar exemplos desta invariância, calculando eventos em dois referenciais diferentes.

★ Tempo Próprio - caminho (9)

Discutir os intervalos tipo tempo, tipo espaço e tipo luz. Apresentar um exemplo de intervalo tipo tempo, calculado em dois referenciais diferentes, e introduzir o tempo próprio como um invariante relativístico.

● Intenção Didática

A principal intenção desta aula é mostrar que na relatividade restrita existem tanto grandezas invariantes, como relativas ao referencial. Inicialmente, mostramos os invariantes da geometria espacial, para depois apresentar o conceito de produto escalar, que é essencial na relatividade restrita, porque é através dele que geramos os invariantes relativísticos. A sequência da aula é construída para dar significado aos invariantes. Todos os elementos desta aula foram dispostos e encadeados para preparar a aula 6, quando é abordado o quadrimomento e o invariante relativístico, especialmente importante neste curso, a massa.

Aula 6 - Relatividade: energia e massa

• Descrição da Aula

Essa aula é a última aula de relatividade teórica e técnica do curso. Ela é complementar à aula 5 e, por isso, percorre os caminhos da outra parte do esquema. Os conceitos que completam a relatividade restrita, até chegar à massa e à energia, são apresentados nesta aula. A figura reproduzida abaixo mostra o restante do esquema da relatividade e, descrevemos os passeios por ele em seguida.

★ Revisão e Problema do Ímã e Espira

Revisar as grandezas invariantes e relativas ao referencial apresentadas na aula anterior. Discutir o problema clássico do ímã e da espira.

★ Quadrimomento - caminhos (1), (2) e (3)/(4), (5) e (6)

Partir das coordenadas de um referencial e deduzir a quadrivelocidade, usando a derivação em relação ao tempo próprio. Em seguida, introduzir o quadrimomento na relatividade restrita e deduzir as suas componentes em dois referenciais diferentes.

★ 4a Componente do Momento e a Energia - caixas (a) e (b)

Analisar a componente temporal do quadrimomento e, através de uma expansão em série de Taylor, mostrar que no limite de baixas velocidades, ela está associada à energia cinética newtoniana. A partir desta expansão, obter a equação da energia relativística em dois referenciais diferentes: um deles em repouso e outro, com velocidade, chegando a $E = mc^2$ e $E = \gamma mc^2$, respectivamente.

★ Trimomento e a Inércia - caminhos (7) e (8)

A partir do resultado da energia relativística, usar as três primeiras componentes do quadrimomento para mostrar que na relatividade restrita, quem faz o papel de massa e tem inércia é a energia.

★ Massa Invariante - caminhos (9) e (10)

Calcular o produto escalar do quadrimomento por ele mesmo e chegar no último invariante relativístico do curso: a massa. Discutir o uso dos termos *massa e energia de repouso* e a conhecida expressão $m = \gamma m_0$.

★ Re-significação

Nesta parte final da aula, recapitular todos os conceitos do curso nos cenários da mecânica, do eletromagnetismo e da relatividade e mostrar as mudanças ocorridas. Fazer uma discussão epistemológica e ontológica dos conceitos de massa e de energia, mostrando a ruptura que a relatividade restrita promoveu. Fechar a aula enfatizando que as propriedades da inércia e da atratibilidade passam a ser da energia.

• Intenção Didática

Esta aula é o ponto alto do curso. É nela que se apresenta a massa na relatividade. A principal intenção é evidenciar as mudanças que este conceito sofreu ao longo de quase três séculos. A massa é apresentada como um invariante relativístico e, isto é mostrado através do produto escalar do quadrimomento. A energia, por outro lado, varia com o referencial, o que pode ser visto pela sua dependência com o fator γ na sua expressão. A intenção do percurso desta aula e da sequenciação das ideias é transferir a propriedade de inércia da matéria para a energia. Além disso, nossa intenção é propiciar uma reflexão acerca da forma como este tema é abordado nos livros didáticos. A simples apresentação das expressões $E = mc^2$ e $m = \gamma m_0$, sem discussões epistemológicas e suas implicações, não traz os significados que nós construímos com este curso.

Aula 7 - $E = mc^2$ em ação...

• Descrição da Aula

Esta é a última aula do curso e é considerada uma aula fenomenológica, onde se aplicam os conceitos vistos, em situações e processos da natureza. Principalmente, mostramos o uso da expressão $E = mc^2$ nos sistemas ligados, partindo de exemplos macroscópicos, até chegar no interior do próton. Apresentamos, também, uma consequência importante da equação de Einstein, que é conferir peso à energia.

★ Reações Exotérmicas

Discutir uma reação exotérmica, de maneira genérica, apresentando o balanço de energia dos reagentes e dos produtos da reação. Equacionar a energia destas reações para três situações: combustão, átomo de hidrogênio e dêuteron.

★ Fóton Emitido

Calcular a energia do fóton emitido nas três situações já apresentadas. Através deste cálculo, mostrar que a frequência deste fóton aumenta, substancialmente, a medida em que lidamos com sistemas cada vez mais ligados.

★ Relatividade e Lavoisier

Mostrar exemplos na física nuclear. O fóton emitido na formação de vários núcleos é

altamente energético, o que resulta numa desigualdade entre a soma das massas dos constituintes e a massa do sistema. Relembrar o conceito de *energia de ligação* e mostrar que a diferença das massas corresponde ao valor desta energia. Enfatizar que a conservação de massa de Lavoisier não vale para a física nuclear.

★ **Peso do Hidrogênio**

Escrever, inicialmente, a equação da energia do hidrogênio, usando a nova concepção relativística, isto é, introduzindo $E = \gamma mc^2$. Mostrar que o peso do hidrogênio é dado por quatro ingredientes: próton, elétron e as energias cinética e potencial. A partir da equação inicial, calcular as porcentagens destas energia e mostrar que o peso das energias cinética e potencial é muito pequeno.

★ **Peso do Dêuteron**

Fazer o mesmo para o dêuteron e mostrar que, neste caso, o peso das energias cinética e potencial correspondem a uma porcentagem significativa. Introduzir o campo gravitacional na discussão e mostrar que as energias também são atraídas por ele.

★ **Peso do Próton**

Calcular a porcentagem do peso total do próton usando os valores das massas dos quarks obtidas de uma tabela de partículas. Enfatizar o resultado que 99% do peso do próton é dado pelas energias cinética e potencial.

★ **Re-significação**

Discutir o significado conceitual e epistemológico do fato de a energia pesar. Relacionar o peso da energia com a atração gravitacional e com a propriedade da atratibilidade que, na mecânica era atributo da massa. Citar o fenômeno das lentes gravitacionais, como evidência desta atração, na relatividade geral. Mostrar os limites da mecânica newtoniana no entendimento do peso de tudo, dissociando definitivamente o peso da massa. Com isso, a massa, no sentido newtoniano, é re-significada.

● **Intenção Didática**

Essa discussão e cálculo das massas e dos pesos desta última aula do curso serve, essencialmente, para mostrar efeitos da relatividade restrita no mundo das partículas. Um

aspecto chocante desta aula é o fato da **energia pesar!** O título do curso só pode ser entendido com estes elementos apresentados. As energias cinética e potencial pesam na balança, ou seja, são atraídas pelo campo gravitacional. Isso é algo muito inédito para alunos e professores, habituados à uma concepção newtoniana do mundo. A forma como essa aula foi planejada e encadeada foi intencional, visando indicar a conexão da relatividade restrita com a geral. A intenção desta aula é a mesma do curso inteiro: mostrar o significado das mudanças que a relatividade promoveu na massa e na energia.

* * *

Como no nosso processo TLS o conteúdo apareceu de várias formas diferentes e entrelaçadas, na última seção deste capítulo, localizamos cada instância no âmbito da nossa pesquisa.

3.4 Instâncias do Conteúdo

Na minha tese, que se iniciou na esfera do *saber sábio* e se estendeu até a efetiva implementação do curso em sala de aula, pelo professor aplicador, o conteúdo de física tratado precisou ser modificado várias vezes, para atender as necessidades determinadas pelas diferentes instâncias do *design*. Inicialmente, o conteúdo foi apresentado na *apostila de apoio*, com aproximadamente 160 páginas e percorrido em detalhes, de forma pedagógica. Em seguida, ele foi reexpresso de maneira muito compacta, na forma dos esquemas conceituais dos três cenários, apresentados no capítulo 1.3.

A partir destas duas instâncias, o conteúdo de física foi distribuído nas 8 aulas, com o intuito de concretizar a *intenção didática* geral, mencionada na seção 2.4. Isso levou a aulas, com conteúdos e IDs próprios, descritas na seção anterior, a 3.3. Com o processo de *design*, o mesmo conteúdo foi explicitado e também incorporado no *manual de instruções*, feito pela equipe de *design* e anexado no apêndice A. Este manual serviu de base para o curso dado pelo professor implementador, descrito na seção 3.1.

Figura 3.4.1: Instâncias do conteúdo

Finalmente, na etapa da análise, foi conveniente reexpressar o conteúdo na forma de *lista de tarefas* de cada aula, que podem ser encontradas no capítulo seguinte, o da metodologia da análise. Para maior clareza, estas diferentes instâncias de manifestação do conteúdo são mostradas na figura 3.4.1, junto com a localização delas nesta tese.

* * *

Com a descrição do curso e das aulas apresentada neste capítulo, encerramos a fase de relatar o planejamento. A etapa seguinte foi a implementação do curso e, no próximo capítulo, mostramos a metodologia para a coleta de dados e para a análise das aulas.

Capítulo 4

Metodologia da Pesquisa e Análise

As nossas questões de pesquisa, descritas na seção 2.4, estão relacionadas à transferibilidade da intenção didática no desenvolvimento de uma sequência didática. Sendo a ID importante para orientar o ensino de um saber, garantindo que este não se descaracterize ao longo das três esferas de Chevallard, a confecção de uma TLS deve suportar a sua manutenção. As *intenções didáticas* geral e particulares de cada aula já foram explicitadas nos capítulos anteriores. O nosso problema de pesquisa consiste em avaliar em que medida este conjunto de IDs foi efetivamente apropriado pelo membro da equipe que desempenhou o papel de professor implementador (PI). Assim, nossa pesquisa, de fato, está localizada nos processos de implementação da sequência e de atuação deste professor.

Na perspectiva DBR, nossa pesquisa se caracteriza como *qualitativa*, pois envolve características pessoais, com forte influência de crenças e idiossincrasias do professor, tratando-se de um *fenômeno educacional* amplo e complexo. Segundo Lofland (apud TRIVIÑOS, 1987, p.126), todo *fenômeno educacional* é um fenômeno social e constituído por seis características que fazem dele algo concreto:

- *os atos*: seriam ações que se desenvolvem em uma situação cujas, características principais estariam representadas por sua brevidade
- *as atividades*: estão representadas por ações em uma situação mais ou menos prolongada e que poderiam ser estudadas através de dias, semanas e meses
- *os significados*: manifestam-se através das produções verbais das pessoas envolvidas em determinadas situações e que comandam as ações que se realizam
- *a participação*: é o envolvimento do sujeito ou adaptação do mesmo a uma situações em estudo

- *as relações*: surgem no intercâmbio que se produz entre várias pessoas que atuam numa situação simultaneamente e toma as características de inter-relações

- *as situações*: estão constituídas pelo foco em estudo, pela unidade que se pretende analisar.

Com essas características, o fenômeno deixa de ser 'vago' e o pesquisador pode investigar formas e variações desses atos, atividades, significados, participação, etc... tudo dentro da situação delimitada pelo estudo. No nosso caso, estas seis características estão presentes nas ações do professor implementador da sequência e nossa análise é baseada na observação delas.

O aspecto subjetivo e descritivo da investigação e o ambiente natural da sala de aula são fatores característicos que dão à pesquisa a classificação *qualitativa*. Especificamente, esse tipo de pesquisa tem alguns atributos básicos que Bogdan e Biklen (apud LÜDKE; ANDRÉ, 1986) apontam. São eles:

- (i) a pesquisa qualitativa tem o ambiente natural como sua fonte direta de dados;
- (ii) os dados coletados são predominantemente descritivos;
- (iii) a preocupação com o processo é muito maior do que com o produto;
- (iv) o significado que o sujeito investigado dá às coisas é foco de atenção do pesquisador;
- (v) a análise dos dados tende a seguir um processo indutivo.

Essas características expressas pelos autores possuem elementos fundamentais para a posterior análise. Ao contrário das pesquisas quantitativas, onde questões são formuladas objetiva e previamente, num processo de educação, dada a sua natureza subjetiva, muitas vezes o percurso metodológico e as questões investigadas vão sendo traçadas durante o processo.

Embora a concepção fenomenológica da pesquisa qualitativa indique que o investigador deva ter no início da sua pesquisa certas ideias gerais, o espírito de trabalho deve ser amplo e flexível. Sobre o rigor do método, Triviños (1987) afirma que

Mas a rigorosidade do método deve permitir, por exemplo, que as perguntas inicialmente formuladas possam ser enunciadas de outra maneira ou em parte ou totalmente substituídas, à luz dos resultados e evidências que o pesquisador está configurando. Esta capacidade de autocorreção do método, de *feedback*, de avançar adaptando-se a circunstâncias que se apresentam, guiando-se por hipóteses novas, separa a etnografia diametralmente dos enfoques quantitativos e experimentais (TRIVIÑOS, 1987, p.123).

No nosso caso, alguns elementos relevantes para a futura análise só puderam ser percebidos quando a implementação da sequência já havia se iniciado. Durante o acompanhamento e observação das primeiras aulas da sequência, o caminho metodológico foi ficando mais claro e pudemos perceber quais eram exatamente os aspectos que iríamos observar na atuação do professor. Consequentemente, a questão de pesquisa foi sendo reformulada e adaptada à essa nova visão e interpretação da realidade.

Em relação ao contexto criado com a implementação da sequência didática e a situação única a qual o professor implementador foi submetido, essa pesquisa, além de caráter qualitativo, também se enquadra em um *estudo de caso*. Lüdke e André (1986, p.19) destacam os princípios associados ao estudo de caso:

- visam à descoberta
- enfatizam a 'interpretação em contexto'
- buscam retratar a realidade de forma completa e profunda
- usam uma variedade de fontes de informação
- revelam experiência vicária e permitem generalizações naturalísticas
- procuram representar os diferentes e às vezes conflitantes pontos de vista presentes numa situação social
- os relatos utilizam uma linguagem e uma forma mais acessível do que os outros relatórios de pesquisa

Com base nesses princípios, podemos perceber que nossa pesquisa tem diversas semelhanças, pois partimos de pressupostos iniciais, delineados por alguns conceitos teóricos da literatura¹, e buscamos novos elementos e dimensões do problema para serem alcançados. O contexto no qual a questão de pesquisa se insere é absolutamente importante e deve ser levado em consideração para toda e qualquer interpretação. A investigação deve, também, contar com a multiplicidade de dimensões presentes na situação à qual o professor foi submetido, ou seja, a abordagem do problema deve enfatizar a situação como um todo, evidenciando a inter-relação de todos os elementos presentes no processo. Por fim, embora estejamos estudando o caso de um único professor submetido a uma determinada situação de inovação, devemos considerar esse caso altamente representativo. Nesse sentido, generalizamos essa situação e não tratamos mais como um professor, mas sim como uma

¹Transposição didática e 3 esferas do saber (Chevallard), saberes docentes (Tardif, Gauthier, Perrenoud e outros), obstáculos epistemológicos (Bachelard), obstáculos didáticos (Brousseau), estruturas e mapas conceituais (Novak, Machado, Robilotta), etc.

classe, a classe de professores. Por isso, a generalização ocorre no momento em que o pesquisador/leitor associa os dados encontrados no estudo com suas experiências pessoais.

4.1 Coleta de Dados do Curso

A metodologia associada à TLS pode gerar uma quantidade muito grande de dados para a pesquisa. Esses dados são, em geral, delimitados e reduzidos em função das questões de pesquisa. Segundo Triviños (1987), numa pesquisa com abordagem qualitativa, os dados podem ser coletados através de três formas: a observação, entrevista e análise documental.

Como o foco principal do nosso trabalho é a atuação do professor implementador da sequência didática, a extração do material que foi analisado ficou restringida, essencialmente, às etapas de desenvolvimento da TLS propriamente dita e da sua implementação. No processo de *design*, as reuniões aconteceram sob a minha coordenação, durante um período de 3-4 meses. Essas reuniões foram gravadas em áudio para permitir uma aferição das discussões realizadas. A implementação da sequência didática foi inteiramente filmada e esses vídeos constituem a nossa principal fonte de dados, pois eles que foram analisadas. Além disso, tive a oportunidade de presenciar todas as aulas, o que gerou anotações particulares, consideradas como um *diário de campo*.

Ao fim de cada aula foi solicitado ao professor implementador que fizesse um relato pessoal sobre ela, especificamente. O objetivo desse relato é possibilitar que ele comente qualquer aspecto, impressão, dificuldade, sensação sobre ele mesmo e sobre os alunos, sentidos durante a aula dada. Ao final, foram produzidos quatro relatos pessoais do professor, que consideramos essenciais para a *análise documental*. Paralelamente, elaboramos um pequeno instrumento de avaliação para que os alunos respondessem ao final de cada aula. Esse instrumento, que chamamos de *filipeta*², é constituído de duas perguntas curtas para identificar se em algum momento da aula o aluno sentiu (a) prazer intelectual e (b) que **não** estava entendendo porque aquilo estava sendo falado. Na figura 4.1.1, mostramos esta filipeta, que também está anexada no apêndice B. As informações nelas contidas, advindas das respostas dos alunos, foram usadas para complementar a investigação da atuação do professor nesses momentos específicos, indicados por eles. Elas podem ser um indicativo das habilidades do professor implementador para cumprir cada conteúdo.

²Esse instrumento e o nome *filipeta* foram inventados pelo Nicolau Junior (2014), que também trabalhou com uma sequência didática no seu mestrado.

Nome: _____ data: ____ / ____ / ____

Aula: ____ (1^o ou 2^o) Momento do ____ sábado

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual** :

(b) que **não** estava entendendo porque aquilo estava sendo falado:

Figura 4.1.1: Filipeta entregue aos alunos

As oito aulas do nosso curso, ministradas pelo professor implementador que participou do *design*, foram gravadas integralmente. Estas gravações foram realizadas por mim, com foco na atuação do professor, na sua lousa e nas intervenções dos alunos. Em média, aproximadamente 16 alunos participaram da aula em cada sábado.

Destas oito aulas, três são de mecânica (aulas 0, 1 e 2), duas de eletromagnetismo (aulas 3 e 4) e três de relatividade (aulas 5, 6 e 7). Dado o caráter qualitativo da nossa pesquisa, escolhemos apenas uma aula de cada cenário, para termos as três áreas representadas. Isto permitiu investigar a atuação do professor nos três contextos e entender o seu desempenho em conteúdos tradicionais e em inovadores. As aulas analisadas foram as seguintes:

- Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica (dada no 2^o momento do 1^o sábado)
- Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação (dada no 1^o momento do 3^o sábado)
- Aula 6 - Relatividade: Energia e Massa (dada no 1^o momento do 4^o e último sábado)

* * *

Considerando a característica teleológica do nosso curso e os seus elementos classificados como **tipo meio** e **tipo fim**, partimos da observação das aulas, para verificar em que medida o conteúdo preparado e planejado nas reuniões de *design* foi cumprido. A abordagem e a forma **sugeridas** ao professor para preparar e ministrar suas aulas foram discutidas nas reuniões e estão descritas, de maneira mais objetiva no *manual de instruções* e, de maneira mais detalhada, na *apostila de apoio*, anexados nos apêndices. A *intenção didática* esteve

presente em todo o processo e permeou as diferentes instâncias do planejamento. Entretanto, o planejamento do curso não é o curso. O curso real acontece em uma dimensão diferente tanto da do planejamento quanto da do material escrito. O curso real são as aulas, que estão na terceira esfera do saber de Chevallard. A análise das aulas permitiu verificar **como** a materialização do curso ocorreu de fato e se a *intenção didática* original chegou até a sala de aula. Como discutido nos capítulos anteriores, a *intenção didática* deveria fluir através das diferentes instâncias existentes no processo. Nesse contexto, o ponto crítico é a última instância, a sala de aula.

A *apostila de apoio* foi entregue ao professor no início do processo e largamente discutida nas reuniões de design. O *manual de instruções* foi desenvolvido juntamente com a equipe, com a participação dos três colaboradores, conforme mencionado no capítulo 3.1. A ID esteve sempre presente no processo, embora de maneira tácita. Os significados, objetivos e intencionalidades estavam explicitamente colocados nas ações acordadas pela equipe. Por isso, podemos considerar que a ID faz parte de uma espécie de *contrato*, que o professor implementador deveria seguir e cumprir na implementação do curso. Por constar neste *contrato*, a ID é passível de verificação e, portanto, a transformamos em objeto de nossa pesquisa.

Na nossa análise, estamos interessados em observar **como** o professor implementador ministrou suas aulas. A forma como ele explicou cada conteúdo gerou informações sobre: (i) as habilidades relacionadas a cada tópico e (ii) a apropriação da ID inicial. Estes dois aspectos estão relacionados às nossas questões de pesquisa, sendo uma delas sobre as habilidades específicas referentes aos conteúdos inovadores e a outra sobre a transferibilidade da TLS.

4.2 Método da Análise

O nosso curso pode ser comparado com uma narrativa de uma peça de teatro, onde vários elementos são empregados simultaneamente para favorecer a manifestação da intenção do diretor. Na peça, elementos tais como a música, os gestos dos atores, a iluminação, as roupas, o timbre da voz dos atores, a fala, uma entonação de voz diferente, etc, são detalhes que se somam e produzem um resultado global, que o expectador pode captar. A peça conta uma história e em cada instante, estes elementos se juntam e produzem um efeito no público, transmitindo uma mensagem carregada de intenção.

A nossa TLS também é considerada uma *narrativa*, porém, didática. Explicitar qual é a *intenção didática* do nosso curso não é uma tarefa simples. Por isso, analogamente à peça de teatro, decompusemos a ID do curso em alguns elementos, que chamamos de **componentes da intenção didática**. Deste modo, a análise do desempenho do professor implementador se torna mais objetiva e está focada nestas componentes, que cooperam para a formação de uma aula.

A identificação das componentes a serem utilizadas neste trabalho partiu das categorias de análise de Karam (2012). Este autor realizou um trabalho, onde analisou aulas de eletromagnetismo de um professor do IFUSP e seu foco principal foi investigar o papel da estruturação matemática no ensino de física. Ele desenvolveu uma série de categorias para verificar abordagens didáticas, que serviram como “*ferramenta de análise para fundamentar/motivar discussões pontuais sobre critérios de qualidade didática*” (KARAM, 2012, p.223). Das oito categorias criadas por ele, usamos três, fundindo-as em duas componentes da nossa ID e, também, criamos outras três. As nossas cinco categorias, chamadas *Ordenamento*, *Matemática*, *Significação*, *Epistemologia* e *Re-significação*, estão mostradas na figura 4.2.1, juntamente com as suas siglas e descritas em detalhes, a seguir.

sigla	componentes da I.D.	categorias do Karam
ORD	Ordenamento	
MAT	Matemática	Matemática e Interpretação
SIG	Significação	
EPI	Epistemologia	Epistemologia
RE-SIG	Re-significação	

Figura 4.2.1: Componentes da I.D. e categorias de Karam

Descrição das Componentes da I.D.

1^a) **Ordenamento**: Preservar a integridade da narrativa didática, mantendo a sequência das ideias.

Esta componente da ID é da máxima importância, pois o ordenamento intencional das ideias caracteriza e dá a estrutura do curso. Os tópicos apresentados devem seguir rigorosamente a ordem proposta no planejamento, para possibilitar a mudança de entendimento do conceito de massa.

2ª) Matemática: Representar os conceitos e suas relações, através de estruturas matemáticas e interpretá-los fisicamente.

Esta componente da intenção didática envolve a apresentação tanto de equações isoladas, que representam os conceitos físicos, tal como a do campo coulombiano, como de deduções, mesmo que simples, de relações entre grandezas físicas, como os teoremas da energia cinética e impulso, partindo da 2ª lei de Newton. Um dos objetivos de apresentar essas estruturas matemáticas é relacioná-las com situações físicas reais, interpretando o significado das mesmas. Por exemplo, no contexto da mecânica, na aula 1, é apresentado o teorema do impulso e da energia cinética, através de fórmulas. Em seguida, discutimos uma situação de choque entre duas bolinhas e calculamos a variação da quantidade de movimento em três casos, variando a massa de uma delas. A intenção deste cálculo é interpretar fisicamente o **porquê** a variação da quantidade de movimento da bolinha 1 aumenta quando se aumenta a massa da bolinha 2. Essa interpretação estabelece ligações entre os conceitos de inércia, força e massa do esquema conceitual que embasa esta aula.

A interpretação está ligada à fenomenologia e ao significado de leis físicas e de expressões matemáticas, mesmo que estas expressões carreguem ideias simples. O conhecimento científico é expresso em linguagem matemática e a interpretação do significado desta linguagem tem implicações na natureza.

Durante o curso, esta componente estava prevista em várias situações, onde se associam formalismo matemático aos conceitos físicos. Isso enfatiza o aspecto estrutural do conhecimento, mostrando que a representação de alguns fenômenos físicos são justificadas por **leis** expressas matematicamente. Assim, a abordagem de alguns conteúdos deve estar apoiada nas equações de Maxwell, na expressão do campo coulombiano, etc. Esta abordagem numa aula de física zela pelo caráter matemático e enfatiza um aspecto da natureza do conhecimento científico, que o distingue de outros conhecimentos, como os das ciências humanas. Este enfoque atribui causas às ocorrências físicas e explica o porquê fenômenos ocorrem.

3ª) Significação: Estabelecer o significado de alguns conceitos chave.

O curso abrange conteúdos de física e trabalha a dimensão da *extensão* do conhecimento, pois envolve o cenário da mecânica, do eletromagnetismo e da relatividade. Por outro lado, o caminho que é seguido é focado no conceito de massa. Durante o planejamento, foram escolhidas entidades fundamentais de cada cenário e instrumentais para a discussão da massa, que permitem chegar a sua re-significação na relatividade restrita. Por isso, o curso é construído com pré-requisitos, havendo a necessidade de significar alguns deles, tais como *energia de ligação*, *poço de potencial*, localização da *energia do campo*, *origem da radiação*, etc. A significação de um conceito foi discutida no capítulo 1.3 e é feita pelas ligações que o circundam, que ao final dão um nexo a ele, como pertencente a um todo. Um indício de ausência de significação de um conceito pode estar na quebra do nexo de uma sequência lógica que o explica.

4ª) Epistemologia: Discutir aspectos do 'fazer física' durante a apresentação dos conceitos, através de discussões filosóficas.

Esta componente teve uma grande importância no *design* e no planejamento da TLS. Todos os conteúdos físicos apresentados durante o curso devem ser precedidos de discussões epistemológicas, dando assim, um sentido amplo à construção da física. Por exemplo, na aula 3, sobre o átomo de Hidrogênio, planejamos uma discussão sobre aspectos da física relacionados à fenomenologia, experimentação e ao uso de modelos como pontes que unem as dimensões teórica e fenomenológica da ciência. Esta componente trata de aspectos da natureza da ciência como um todo e, portanto, transfere conhecimentos sobre a *extensão* da física.

5ª) Re-significação: Re-significar alguns conceitos chave.

Esta componente da ID está relacionada à reestruturação de alguns conceitos chave, tais como inércia, energia, ação-reação, momento, massa, etc. Embora estes conceitos já sejam de conhecimento da maioria dos alunos, o curso se preocupa em transmitir a mudança de significado que ocorre com cada um deles. Esta mudança está também associada ao seu reposicionamento nos esquemas conceituais de cada cenário. A intenção do curso é promover novas ligações entre alguns conceitos e mostrar como eles mudam de significado de uma teoria para outra.

Momento de Estruturação - M.E.

Parte da *intenção didática* é criar momentos de prazer intelectual com determina-

das atividades. Comentamos anteriormente, na seção que descreve o curso, que esses momentos estão relacionados com duas características importantes do processo de ensino/aprendizagem: o ato de *estruturar o conhecimento* e o ato de *dar significado aos conceitos*, que permitem perceber a unidade da física. Supomos que o momento em que ocorrem essas ligações são causados pelos elementos **tipo fim** que, por darem sentido global ao curso e passar o nexos da narrativa didática, criam momentos de estruturação (M.E.). Contudo, é preciso ressaltar que estamos apenas mostrando a intenção de criar esses momentos e ela esteve presente durante todo o processo de *design*. Não está no âmbito desta pesquisa desenvolver instrumentos para constatar a ocorrência desses momentos, pois precisaríamos entrar na área da cognição e da aprendizagem.

Como a análise foi feita

O comparecimento de cada componente da ID nas aulas não é uniforme e depende do conteúdo específico tratado. Em cada cenário, mecânica, eletromagnetismo e relatividade, as oportunidades de manifestação das cinco componentes variam. Por exemplo, se durante uma aula inteira de mecânica, na explicação de um determinado tópico, estava planejado fazer uma **significação**, a análise sobre a ID *Significação* será feita neste único episódio. Assim, independentemente do número de comparecimentos de cada componente, analisamos as aulas buscando saber: (i) se o professor implementador manifestou aquela componente e (ii) como ele o fez.

Com isso, o desempenho do professor foi comparado com o planejamento da TLS, baseado na *apostila de apoio*, no *manual de instruções* e nas reuniões preparatórias, enfatizando as várias componentes da ID. Para isso, elaboramos uma tabela para cada aula analisada com a *lista de tarefas*³, que o professor implementador deveria cumprir, classificando cada uma delas quanto à sua *funcionalidade* no curso, isto é, se ela é **tipo meio** ou **tipo fim**. A seguir, apresentamos as três tabelas das aulas analisadas.

³Esta *lista de tarefas* é considerada uma instância em que o conteúdo apareceu, conforme mostramos na figura 3.4.1. Observe que nesta figura, apresentada no capítulo 3.4, ela está localizada na fase da análise, que ocorreu após a implementação.

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica		
n^o	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Localizar a energia no quadro e justificar com o T. Nöether	meio
2	Apresentar o papel da força : Newton X Leibniz, T. Impulso e T. E. Cinética	meio
3	Mostrar a dedução da conservação da energia a partir do T.E.Cinética para o sistema Terra-Sol. Atividade 1A.	meio
4	Discutir a questão da inércia num problema de choques. Atividade 1B.	fim
	Significado da inércia	M.E.
5	Discutir as propriedades da matéria : inércia e atratibilidade no universo newtoniano	fim
	Significado da massa gravitacional e inercial	M.E.

Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação		
n^o	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Mostrar como são as linhas de campo de uma carga parada e em movimento uniforme	meio
2	Discutir o caso de desaceleração, a bolha de informação e fazer o desenho da deformação das linhas de campo	meio
3	Discutir que na região de transição $\partial \vec{E}$ gera $\vec{B}$, o que corresponde a uma onda eletromagnética que se propaga. Mostrar o simulador <i>radiation 2D</i>	meio
4	Mostrar que a 3 ^a lei de Newton não vale para essa situação	fim
	Significado: ruptura da mecânica	M.E.
5	Discutir a conservação do momento nesse caso e enfatizar que onda carrega momento	fim
	Significado: luz tem inércia e momento	M.E.

Aula 6 - Relatividade: massa e energia		
<i>nº</i>	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Definir o quadrimento na relatividade restrita a partir do tempo próprio	meio
2	Discutir o significado da 4ª componente do e chegar no conceito de energia em dois referenciais diferentes	fim
	Significado: $E = mc^2$ e $E = \gamma mc^2$	M.E.
3	Calcular o p^2 (produto escalar $\vec{p} \cdot \vec{p}$) e chegar na massa invariante	fim
	Significado: massa é invariante relativístico	M.E.
4	Discussão epistemológica e ontológica sobre a massa e a energia, percorrendo e interpretando todos os resultados apresentados	fim
	Significado: inércia da energia	M.E.

Com estas listas de tarefas das aulas 1, 4 e 6, pudemos verificar o desenvolvimento das cinco componentes da ID em cada uma delas e localizar discrepâncias em relação ao planejamento original. Os resultados são apresentados no capítulo 5 e sintetizados por meio de dois tipos de tabela. O primeiro tipo, mostrado na figura 4.2.2, compara a lista de tarefas prevista com os pontos onde houve ocorrências significativas. Para facilitar, acrescentamos dois eixos envolvendo o tempo, sendo um deles, o sugerido no manual para o cumprimento das tarefas e o outro, com o tempo que o professor implementador levou para realizá-las.

O segundo tipo, mais compacto, mostra o número de ocorrências de cada componente da ID em cada aula. Trata-se de uma tabela que indica estas ocorrências e em quais tarefas elas apareceram. Na figura 4.2.3 mostramos esta tabela preenchida para o mesmo exemplo hipotético apresentado acima.

A figura 4.2.2 é complementar à 4.2.3 e se refere à mesma aula. Na primeira, a componente *Matemática* apareceu duas vezes nas tarefas T1 e T3 e, por isso, indicamos estas informações na segunda tabela. Por exemplo, a componente *Re-significação* apareceu três vezes, durante o cumprimento das tarefas T3, T4 e T5, o que nos levou a preencher a segunda tabela com as informações mostradas. Além destes indicadores, as tarefas consideradas **tipo fim** foram escritas em vermelho para destacar.

Aula Hipotética				
n°	lista de tarefas	classif. das tarefas		componentes da I.D.
1	T 1	0	meio	MAT
2	T 2	20	meio	SIG
3	T 3	40	meio	MAT RE-SIG
4	T 4	60	fim	RE-SIG
	Significado: ...		M. E.	
5	T 5	90	fim	RE-SIG
	Significado: ...	120	M. E.	

↓ *tempo do manual* ↓ *tempo da aula*

Figura 4.2.2: Exemplo hipotético das componentes da ID

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	-	0
<i>MAT</i>	T1 e T3	2
<i>SIG</i>	T2	1
<i>EPI</i>	-	0
<i>RE-SIG</i>	T3, T4 e T5	3

Figura 4.2.3: Exemplo hipotético de um resultado de análise

Neste trabalho, analisamos três aulas do curso, uma de cada cenário, observando o desempenho do professor implementador em cada componente da intenção didática. O resultado desta análise é mostrado nas próximas três seções, com tabelas semelhantes às apresentadas acima. Inicialmente, descrevemos essas aulas, no que diz respeito à observação das ocorrências das cinco componentes, mostrando o primeiro tipo de tabela e, em seguida, apresentamos o resultado na tabela mais sintética.

4.3 Análise da Aula de Mecânica

A aula de Mecânica que analisamos foi a primeira dada pelo professor implementador. Esta aula trata da discussão de alguns conceitos da mecânica, tais como a força, a energia cinética, a energia potencial, a quantidade de movimento e as suas relações com a massa no universo newtoniano. As tarefas previstas para esta aula já foram apresentadas, na seção 4.2.

Na tabela da figura 4.3.1, sintetizamos os *momentos sugeridos* ao professor contidos no *manual de instruções* e mostramos, no eixo vertical da esquerda, o tempo previsto para cada tarefa. O tempo real da aula dada pelo professor está no eixo da direita. Nesta aula estavam previstas duas atividades para os alunos, 1A e 1B, que fazem parte das tarefas 3 e 4, respectivamente. Estas atividades são sugestões para uma discussão prévia entre os alunos do conteúdo da tarefa.

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica			Duração: 2 h 01 min = 121 min	
nº	lista de tarefas	classif. das tarefas		componentes da I.D.
1	Localizar a energia no quadro e justificar com o teorema de Nöether	0 20	6min	ORD
2	Apresentar o papel da força: Newton X Leibniz, demonstrando o teorema do Impulso e o da Energia Cinética	40	27min	ORD SIG
3	Mostrar a dedução da conservação da energia a partir do teorema da energia cinética para o sistema Terra-Sol. Atividade 1A	85	43min	ORD
4	Discutir a questão da inércia num problema de choques e sua relação com a força Atividade 1B	110	95min	SIG
	Significado da INÉRCIA	M. E.	116min	
5	Discutir as propriedades da matéria: inércia e atratibilidade no universo newtoniano	120	121min	SIG
	Significado: MASSA GRAVITACIONAL E INERCIAL	M. E.		

↓ tempo do manual
↓ tempo da aula

Figura 4.3.1: Distribuição das componentes - aula 1

De maneira geral, a aula transcorreu bem e o conteúdo foi dado no tempo previsto de 2h01min. Durante a aula, observamos algumas ocorrências nas componentes *Ordenamento* e *Significação*, em momentos específicos da aula. A figura 4.3.1 indica, na última coluna,

a componente da I.D. em que houve algum desvio em relação ao previsto e, do lado direito desta coluna, o intervalo da aula em que ele ocorreu, associado à tarefa.

Descrição das Componentes Observadas

Tarefa 1: Localizar a energia no quadro e justificar com o teorema de Nöether

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [0 - 20min]

Intervalo do professor: [6min - 27min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento*

A discussão prevista para a tarefa 1, da aula 1, era localizar a energia no quadro do universo newtoniano e justificar, com o teorema de Nöether, sua ligação com o tempo, que também está localizado no palco. Embora não fosse nosso objetivo destrinchar o teorema, mas sim, apenas citar o seu significado, a menção a ele é importante, pois associa o tempo com a conservação da energia e o espaço com a conservação dos momentos linear e angular.

Ao colocarmos a energia no **palco**, associada ao tempo, nossa intenção é confrontar uma possível pré-concepção que energia é substância, tal como a massa. Na mecânica, a massa é um **ator** e sua localização é modificada nas duas relatividades, passando a fazer parte do palco, junto com a energia, na relatividade restrita e alterando as propriedades do espaço-tempo, na relatividade geral. Assim, a discussão inicial da energia tem caráter epistemológico e foi prevista para transmitir essas informações, que deverão ser modificadas em aulas posteriores. A discussão da energia está no capítulo 2 da *apostila de apoio* entregue ao professor, anexado no apêndice. O quadro abaixo sintetiza estas ideias.

universo físico clássico		
momentos linear e angular		energia
↑		↑
palco:	espaço e	tempo
diretor: leis dinâmicas: $\vec{F} = m\vec{a}$ Ação e Reação		
atores: matérias e campos		

A tarefa 1, na aula do professor, foi feita no intervalo de [6:45 - 27:27]. Ele inicia esta tarefa retomando o quadro do universo físico clássico da lousa, feito na aula 0, pelo

professor do IFUSP, dizendo que de alguma forma irá justificar o porquê da energia aparecer no palco. A figura 4.3.2 mostra um instante da fala inicial do professor implementador. Primeiramente, a iniciativa do professor é de justificar o porquê a energia não pode ser um **ator** e argumenta que *'o ator é uma entidade absoluta, né, como é a massa. Como a energia é... tem o exemplo da energia cinética, se eu estou me movimento tem energia cinética para vocês, mas para mim não... essa imaterialidade da energia me faz com que eu desloque a energia desta posição'* (aponta para a posição dos atores) [9:30 - 9:54]. Ele apresenta esta como a primeira razão para a energia estar no palco.

Figura 4.3.2: Retomada do quadro - aula 1 - [9:16]

Em seguida ele parte para a discussão da palavra energia, referindo-se ao cuidado que se deve ter com o uso de palavras. Comenta que existem palavras que foram criadas na antiguidade, num determinado contexto, e que hoje usamos com significados completamente diferentes, como é o caso das palavras **democracia** e **átomo**. Seus comentários ocorrem no trecho [10:00 - 11:00].

A seguir, o professor apresenta Leibniz como contemporâneo de Newton, narrando as disputas intelectuais entre ambos. Ele opta por apresentar elementos históricos, principalmente sobre a filosofia de Leibniz, que dura cerca de 2 minutos. Ele afirma que este filósofo da natureza, já em meados do século XVII, pensava em algo que para nós hoje é a energia. Ele diz:

[12:56 - 13:37] Leibniz acredita na ideia de que o universo tem uma ordem já pré-estabelecida a partir do momento em que foi criada. E esta ideia de ordem pré-estabelecida me parece que está muito

atrelada à ideia de conservação. Porque se existe uma ordem já estabelecida no universo, existem quantidades já estabelecidas no universo. Então tem alguma coisa no universo que se conserva. O Leibniz trabalha essa discussão e introduz o conceito de *vis viva*, que é um proto conceito de energia.

Após estes comentários históricos, o professor se volta para seu slide projetado na lousa, introduzindo a história do conceito de energia emergente em torno de 1840, com os trabalhos de Mayer e Joule. Seu discurso vai no sentido de dizer como um conceito é desenvolvido na Física e o tempo que leva para ele se estabelecer. Dá como exemplo a história do **átomo** e afirma:

[14:50 - 16:01] Quer ver outra coisa interessante? Hoje a gente fala de átomo com muita naturalidade. A gente escolheu em determinado momento histórico que a gente descreveria a natureza a partir de entidades atômicas. A gente estuda teoria cinética, a gente fala a energia cinética das moléculas aumentou... porque a gente... no final do século XIX a gente bateu o martelo dizendo que a melhor maneira de explicar como as coisas aconteciam na natureza era em forma de átomo. Mas isso não era consenso. No final da segunda metade do século XIX, os filósofos (cientistas da natureza) estavam ainda discutindo qual era a melhor maneira de descrever a natureza. Então, existiam correntes energiscistas que se opunham a descrever a natureza por meio de átomos. Existem célebres pesquisadores, Ernest Mach por exemplo, é um anti-atomista convicto. Ele acha que o átomo é uma invenção e que não tem que descrever a natureza em termos atômicos. Tem que abandonar esta ideia.

Após esse comentário, uma aluna interrompe e pergunta sobre as partículas elementares. O pequeno diálogo entre o professor e aluna ocorre no intervalo [16:28 - 17:05], transcrito abaixo.

Aluna: Como hoje acontece com as partículas elementares?

Professor: É... eu não sei é no contexto que você está falando... mas será que existe uma partícula elementar? A gente fica buscando a partícula, a partícula, a partícula,... será que os quarks são partículas elementares ou será que existe algo mais fundamental? Aí o pessoal começa a falar de cordas... né? quer dizer, a gente ainda está nessa busca. E em a gente tem que fazer escolhas. A moldura do universo é feita com estes critérios.

O professor volta a falar da energia, após este diálogo, apontando para o seu slide, mostrado na figura 4.3.3, e lê as frases já apresentadas, caracterizando a energia. Ele diz que ela '*é intangível, não ocupa lugar no espaço, não é um ente absoluto, não é um ator*'. Sua tentativa é de mostrar, novamente, que a energia não pode ser classificada como 'ator'.

Figura 4.3.3: Slide apresentado pelo professor - [18:05]

No trecho seguinte, o professor vai para a conservação da energia, questionando qual o papel da conservação no universo físico clássico. Ele apresenta o teorema de Nöether e sua discussão tende a ser mais epistemológica do que conceitual-matemática. Ele trata o teorema falando das hierarquias entre as entidades envolvidas, o que gera o questionamento de um aluno, que confessa estar confuso. Um trecho do discurso do professor está transcrito abaixo.

[24:15 - 24:52] O teorema de Nöether mostra que a conservação da quantidade de movimento não é uma lei tão fundamental. Ela é uma consequência de algo mais fundamental que é a uniformidade do espaço: espaço homogêneo, uniforme...então, ele mostra essa ideia. E eu coloquei essas equações (refere-se a outro slide com o princípio da incerteza nas formas $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$ e $\Delta p \Delta x \geq h/2\pi$) que são interpretações do Princípio da Incerteza de Heisenberg. E veja que as duas relacionam isso. Na verdade, o Princípio da Incerteza de Heisenberg é uma espécie de tradução física do teorema de Nöether.

Após este comentário, o aluno diz que achava que a Nöether tinha determinado que todas as leis de conservação correspondem a uma simetria [26:00] e que esta simetria é que era fundamental. O professor concorda e complementa dizendo que, do ponto de vista epistemológico, a simetria do tempo é mais fundamental que a conservação da energia.

• Comentários:

A discussão do conceito de energia foi realizada dentro do tempo previsto no *manual de*

instruções e transcorreu bem. Entretanto, observamos alguns aspectos que dizem respeito à componente da I.D. *Ordenamento*. No início da tarefa, o professor introduz uma discussão sobre Leibniz, que estava prevista para acontecer na tarefa 2. Sua discussão teve cunho histórico e suscitou discussões, como a questão do *átomo* e do *atomismo*, motivando um questionamento de uma aluna no trecho [16:28 - 17:05].

A introdução de elementos não previstos, por parte do professor, pode ter duas consequências, uma em relação ao tempo e outra, em relação à atenção e foco dos alunos. A primeira, atrasa o andamento da aula e pode prejudicar as tarefas seguintes previstas e a segunda, desvia a atenção dos alunos para conteúdos que não convergem para os elementos **tipo fim** da sequência. Por isso, registramos a ocorrência da componente da ID *Ordenamento*, à esta introdução de conteúdos diferentes.

* * *

Tarefa 2: Apresentar o papel da força: Newton X Leibniz, demonstrando o teorema do Impulso e o da Energia Cinética

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [20min - 40min]

Intervalo do professor: [27min - 43min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento* e *Significação*

A tarefa 2 consiste em chegar aos dois teoremas que relaciona o efeito da força sobre um corpo. Estes teoremas foram tratados por Newton (teorema do Impulso) e por Leibniz (teorema da Energia Cinética). Após a dedução de ambos, era previsto uma discussão sobre a relação da força com a massa, utilizando a quantidade de movimento e a energia cinética. Esta relação entre a força e a massa é algo muito presente na mecânica newtoniana. Na relatividade, a massa continua sendo uma grandeza central, porém, a força deixa de ser importante. O objetivo, então, desta tarefa é construir uma concepção para, posteriormente, modificá-la.

O professor cumpre esta tarefa no intervalo [27:27 - 43:00]. Ele inicia seu discurso dizendo que existem três formulações para a 2ª lei de Newton: uma newtoniana, outra leibniziana e outra euleriana. Diz que vai começar mostrando como a força atua neste palco físico.

No intervalo de [28:40 - 33:40], o professor deduz na lousa (mostramos na figura 4.3.4) os dois teoremas, enfatizando as abordagens newtoniana e leibniziana. Sua dedução é

feita com base na seção 2, do capítulo 2, da *apostila de apoio*. Sua dedução dura cerca de 5 minutos e, em seguida, ele aponta para a presença da **força** no universo newtoniano. Diante dos dois teoremas na lousa, sua discussão nos próximos dois minutos [36:00 - 37:50] é baseada na massa e na mudança de velocidade que ela pode sofrer. Ele enfatiza a questão da inércia. Num dado instante, o professor implementador interrompe a discussão da inércia e volta para a 2ª lei de Newton, dizendo que ela tem três versões. Neste momento, introduz novamente elementos histórico-filosóficos sobre Leibniz, Euler e a 'pseudo-definição' de massa de Newton. Seu discurso, de mais quatro minutos, ocorre no intervalo de [37:50 - 41:50]. Em seguida, anuncia a próxima tarefa, dizendo que será visto como relacionar a força com a energia e a sua conservação.

Figura 4.3.4: Slide apresentado pelo professor - [31:14]

- **Comentários:**

A dedução dos dois teoremas, nesta tarefa, foi feita de acordo com o planejamento e o professor demonstrou habilidade na condução desta parte da aula. Nossa primeira observação é em relação à componente da I.D. *Ordenamento*. Novamente, o professor introduz elementos históricos e filosóficos, desviando a discussão já iniciada por ele sobre a inércia da massa. Isto ocorreu no trecho [37:50 - 41:50]. O principal objetivo da tarefa 2 é reforçar a ligação entre a **força** e a **massa**, dando maior significado a ambos, através

dos teoremas do impulso e da energia cinética. O desvio da discussão com elementos não previstos na sequência alterou a intenção de significar **força** com **massa**. Por isso, consideramos que a componente da I.D. *Significação* também foi fragilizada nesta tarefa.

* * *

Tarefa 3: Mostrar a dedução da conservação da energia a partir do teorema da energia cinética para o sistema Terra-Sol. Atividade 1A.

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [40min - 85min]

Intervalo do professor: [43min - 95min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento*

A tarefa 3 consiste em mostrar a organização da mecânica newtoniana e as principais ligações entre os conceitos físicos envolvidos. Tomando como exemplo o sistema Terra-Sol e partindo do teorema da energia cinética advindo da 2ª lei de Newton, é possível deduzir a conservação da energia mecânica. Essa dedução é interessante, porque envolve os conceitos centrais do universo físico clássico, tais como força, neste caso, a gravitacional, massa e as energias cinética e potencial. O objetivo de mostrar essas duas formas de energia é que elas envolvem as massas inercial e gravitacional. Posteriormente no curso, mostramos, na relatividade, que a inércia e atratibilidade estão associadas à energia. Estava previsto, dentro desta tarefa, os alunos fazerem um exercício, que chamamos de Atividade 1A, para discutirem entre si as propriedades da massa.

O professor cumpre a tarefa 3 no intervalo de [43:00 - 95:00]. Ele inicia deduzindo a conservação de energia, conforme estava previsto. Sua dedução é baseada na seção 8, do capítulo 2, da *apostila de apoio* e dura cerca de nove minutos, ocorrendo no intervalo de [43:00 - 52:00]. Em seguida à dedução, o professor aponta as propriedades da matéria, escrevendo na expressão da lousa as palavras 'inercial' e 'gravitacional', conforme mostramos na figura 4.3.5, e parte para a discussão de 'massa inercial x massa gravitacional' num problema de queda livre. O professor argumenta, a partir da relação $m \vec{g} = m \vec{a}$, que as massas gravitacional e inercial são iguais. Entretanto, segundo ele, '*a gente não tem nenhuma evidência para dizer que elas são iguais*' [54:05].

Figura 4.3.5: Dedução apresentada pelo professor - [52:36]

A discussão do exemplo de queda livre dura cerca de quatro minutos e suscita, em seguida, o questionamento de um aluno que sugere a existência de duas massas. O diálogo entre o professor e aluno se estende por mais seis minutos e a discussão gira em torno da massa gravitacional, massa inercial, campo e força. Transcrevemos alguns trechos dela, a seguir, que ocorreram no intervalo [55:50 - 56:57].

Aluno: Uma massa depende do campo e a outra não, né?

Prof.: Uma se manifesta com a ação do campo e a outra se manifesta na mudança do estado do movimento. Quando você escreve $m \vec{a}$ do Newton, nós estamos falando de massa inercial. E aqui (aponta para $m \vec{g}$), nós estamos falando de outra massa, né?

Aluno: Essa discussão pode usar: massa existe com o campo e sem o campo? Se você tiver o campo você tem a massa? e se você não tiver o campo você tem a massa também? Como que é isso?

Outro aluno: Quando ela está em repouso ela não tem campo? Uma não existe sem a outra... quer dizer, a massa não existe sem o campo.

Após estes comentários, o professor inicia, autonomamente, um discurso para explicar a diferença entre força advinda do campo e força de ação à distância. Ele se apóia, novamente, em elementos históricos, dizendo que os '*livros apresentam a existência de força advinda de campo ou força de ação à distância como sinônimos*', e aponta que este ou, do ponto de vista histórico, é errado, pois '*elas surgem em contextos históricos completamente diferentes*' [1:00:12]. A introdução destes elementos não previstos para esta tarefa, suscitou

questionamentos dos alunos, em relação ao campo, à massa e a hierarquia entre eles.

Após esta discussão, que dura cinco minutos, o professor propõe aos alunos a Atividade 1A. Os alunos participam desta atividade por 20 minutos, no intervalo de [1:02:00 - 1:22:00]. Em seguida, o professor interrompe a atividade dos alunos e distribui o trecho do livro '*2001 Uma Odisséia Espacial*', previsto no *manual de instruções* para ser discutido 30 minutos depois, ao final da aula. Com o texto em mãos, ele lê junto com os alunos e comenta cada passagem, explicando os aspectos da massa gravitacional e inercial e os exercícios propostos na atividade 1A. Essa discussão final dura mais 10 minutos e a tarefa 3 é finalizada no instante [1:35:00].

• Comentários:

Observamos no cumprimento da tarefa 3 do professor, novamente aspectos relacionados à componente da I.D. *Ordenamento*, que apareceram em dois momentos. Um deles relacionado à introdução de tópicos não previstos e outro, à inversão do conteúdo de uma tarefa. O primeiro episódio ocorreu no trecho [53:00 - 1:02:00], quando o professor inicia a discussão sobre a massa gravitacional e inercial no problema de queda livre que descrevemos. A discussão sobre 'forças de campo ou de ação à distância' e a introdução de elementos históricos não previstos, gerou um desvio da intenção didática da aula.

O segundo episódio em que apontamos a componente *Ordenamento* foi na antecipação da leitura do trecho do livro '*2001 Uma Odisséia Espacial*'. Esta leitura e discussão estava prevista para ser feita no final da aula, após o encerramento das duas atividades, para recuperar e arrematar as ideias principais da aula inteira. O professor antecipa o texto, comentando-o, ao final da tarefa 3, durante o intervalo de [1:25:40 - 1:35:00], conforme citamos na descrição.

* * *

Tarefa 4: Discutir a questão da inércia num problema de choques e sua relação com a força. Atividade 1B.

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [85min - 110min]

Intervalo do professor: [95min - 116min]

Componentes da I.D.: *Significação*

A tarefa 4 é a primeira desta aula que carrega um conteúdo, que consideramos **tipo fim** na sequência didática. Nela, estava prevista uma discussão da relação da força com a

massa e com a inércia. Num problema simples e conhecido de choque entre duas bolinhas, organizamos a atividade 1B. O objetivo deste problema é mostrar que, à medida que a massa da bolinha 2, em repouso, aumenta, a variação da quantidade de movimento da bolinha 1 incidente, também aumenta, evidenciando a ligação entre força e inércia. Neste problema, a abordagem é newtoniana, pois usamos a inércia da bolinha 2 como sinônimo de massa. Esta ligação entre a força e a massa precisa ser significada nesta situação e foi prevista como uma tarefa importante para que, posteriormente, a ligação entre massa, força e inércia possa ser desfeita com a relatividade restrita.

O professor inicia a tarefa 4 distribuindo diretamente a atividade 1B para os alunos discutirem. Isto ocorre no instante [1:35:00]. Após 21 minutos, ele encerra a tarefa 4, no instante [1:56:00], sem fazer a discussão prevista.

• Comentários:

Embora a atividade 1B tenha sido cumprida e entregue aos alunos, ela, por si só, é insuficiente para garantir a significação que pretendíamos. Ela deveria ter sido discutida, também, pelo professor, uma vez que é difícil para os alunos sozinhos perceberem a totalidade e intenção do exercício. Por alguma razão, o professor omitiu a discussão, talvez o tempo avançado. Com isso, ele deixou de trabalhar a relação entre força e inércia, fazendo com que a componente da I.D. *Significação* prevista não aparecesse.

* * *

Tarefa 5: Discutir as propriedades da matéria: inércia e atratibilidade no universo newtoniano

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [110min - 120min]

Intervalo do professor: [116min - 121min]

Lacunas da I.D.: *Significação*

A última tarefa da aula também carrega elementos essenciais para o curso, considerados **tipo fim**. Estava previsto no *manual de instruções*, uma tarefa curta, de apenas 10 minutos, porém, concentrada e que costurasse todos os temas da aula. A ideia era iniciar lendo o trecho do '*2001 Uma Odisseia Espacial*' e recordar os conceitos do universo newtoniano, reforçando a relação entre todos eles. O *design* foi baseado nos esquemas conceituais que construímos e, nesta aula 1, percorremos os caminhos do esquema da mecânica. Em

particular, enfatizamos os conceitos de força, energia, energia cinética, energia potencial, momento, massa e suas propriedades inércia e atratibilidade. A principal intenção de fazer este apanhado nos momentos finais é encerrar a aula num nível conceitual, para transmitir aos alunos a estrutura maior da física clássica. Em seguida, seria distribuída uma atividade para os alunos refletirem em casa.

O professor inicia esta última tarefa explicando o exercício de casa que entregaria para os alunos. Lê cada item do exercício e os comenta. Sua explicação dura 5 minutos e com o horário já avançado, encerra a aula e muitos alunos saem imediatamente.

• Comentários:

Consideramos que a componente da I.D. *Significação* prevista para esta tarefa final não apareceu. A aula do professor foi encerrada praticamente com a atividade 1B. A falta da discussão que arremataria todos os conceitos vistos pode ter prejudicado a significação deles no universo newtoniano.

Resultados da Aula 1

O quadro geral 4.3.1, mostrado no início da descrição da aula 1, envolve apenas as componentes a *Significação* e *Ordenamento*. Conforme descrevemos na seção 4.2, nossa análise geral é sintetizada num quadro, que indica as componentes observadas, as tarefas em que elas apareceram e o índice de ocorrência. No caso da aula 1, o desempenho do professor implementador nas componentes da I.D. é mostrado na figura 4.3.6. As tarefas **tipo fim** estão destacadas em vermelho.

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	T1, T2 e T3	3
<i>MAT</i>	-	-
<i>SIG</i>	T2, T4 e T5	3
<i>EPI</i>	-	-
<i>RE-SIG</i>	-	-

Figura 4.3.6: Desempenho do prof. na aula 1

4.4 Análise da Aula de Eletromagnetismo

A aula de Eletromagnetismo que analisamos foi a de número 4. Esta aula trata da origem da radiação e da 3ª lei de Newton, com a finalidade de mostrar que, nesta situação, a mecânica newtoniana tem uma limitação. Isto é evidenciado com as forças elétricas que aparecem em cargas no espaço, quando uma delas é acelerada, pois estas forças não constituem um par ação e reação. Além disso, ao final desta aula, mostramos que o momento se conserva, porque as ondas eletromagnéticas carregam momento e tem inércia. A construção dos argumentos desta aula foi planejada com o propósito de começar a transferência das características da massa, momento e inércia, para o campo eletromagnético.

Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação			Duração: 1h 47min = 107 min	
nº	lista de tarefas	classif. das tarefas		componentes da I.D.
1	Mostrar como são as linhas de campo de uma carga parada e em movimento uniforme	0 20 meio	6 min 17 min	SIG
2	Discutir o caso da desaceleração, a bolha de informação e fazer o desenho da deformação das linhas de campo	40 meio	28 min	SIG
3	Discutir que na região de transição $\partial \vec{E}$ gera $\vec{B}$, o que corresponde a uma onda eletromagnética que se propaga. Mostrar o simulador <i>radiation 2D</i>	60 meio	33 min	SIG ORD
4	Mostrar que a 3ª lei de Newton não vale para essa situação. Atividade 4A	90 fim	94 min	RE-SIG EPI
	Significado: ruptura da Mecânica	M. E.		
5	Discutir a conservação do momento nesse caso e enfatizar que onda carrega momento	120 fim	107 min	ORD EPI
	Significado: luz tem inércia e momento	M. E.		RE-SIG

↓ tempo do manual
↓ tempo da aula

Figura 4.4.1: Distribuição das componentes - aula 4

As cinco tarefas previstas, apresentadas na seção 4.2, são uma síntese do conteúdo descrito nos *momentos sugeridos* do *manual de instruções*. A figura 4.4.1 indica, na última coluna, as componentes da I.D. em que houve algum desvio em relação ao previsto e, do lado direito dela, o trecho da aula em que isso ocorreu, associado à tarefa. A aula transcorreu bem e todo o conteúdo foi dado no tempo de 1h47min. Durante a aula, observamos as

componentes *Ordenamento*, *Significação*, *Epistemologia* e *Re-significação*, nos momentos indicados na figura.

Descrição das Componentes Observadas

Tarefa 1: Mostrar como são as linhas de campo de uma carga parada e em movimento uniforme

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [0 - 20min]

Intervalo do professor: [6min - 17min]

Componentes da I.D.: *Significação*

O objetivo desta 1ª tarefa é mostrar que as linhas de campo ao redor de uma carga são radiais e simétrica em relação a ela, em duas situações: carga em repouso e em movimento uniforme. A ideia principal é dar significado e sentido às linhas, para depois mostrar a alteração com a aceleração, promovendo, assim, uma re-significação.

O professor cumpre esta tarefa no intervalo de [6min - 17min], iniciando com a apresentação do desenho padrão das linhas de campo de uma carga positiva e negativa, mostrado na figura 4.4.2, e parte para uma discussão de natureza filosófica. Ele apresenta as linhas de campo com um enfoque histórico e reporta-se ao entendimento que Faraday tinha de linhas de força. Ele coloca a questão da ação à distância e como esta questão poderia ser entendida com o conceito de campo, dizendo:

[9:12 - 10:45] A ideia da linha aparece num contexto do ...lembra que eu falei com vocês do problema da ação à distância? O problema da ação à distância é: como é que duas cargas conseguem exercer força uma na outra sem estar encostadas? Esse era o problema! O cara que acreditava em ação à distância diz assim: não tem problema nenhum, uma carga consegue fazer força na outra e não importa que não tem nada no meio. Alguns filósofos da época achavam isso absolutamente natural. De algum modo é o que a Terra faz. Se você colocar um corpo ... sem estar encostado no corpo... ela exerce força. Aí o que acontece, alguns filósofos do século XIX... Newton coloca esse problema... não é que Newton coloca...esse problema é o mesmo problema da gravidade... mas ele só aparece como problema filosófico no séc. XIX. E aí, o que acontece? Uma solução que os filósofos do séc. XIX colocam é assim: 'olha, nós achamos que para duas cargas se comunicarem, tem que ter alguma coisa mediando esta comunicação entre as cargas' e aí surge o conceito de campo. O campo é um ente, a princípio... aí tem uma discussão se ele é ontológico... se ele existe mesmo ou se ele é um ente matemático que traduz a comunicação entre as duas cargas. Isto é uma discussão entre realismo e instrumentalismo de teorias... O fato é que você tem um campo que faz a mediação entre essas duas cargas. Então, o campo é uma resposta ao problema da ação à distância.

Figura 4.4.2: Desenho das linhas de campo - aula 4 - [8:55]

A seguir, o professor faz outro desenho, que mostramos na figura 4.4.3, com uma linha de campo diferente da mostrada anteriormente (da carga em repouso da figura 4.4.2) e explica:

[11:25 - 12:05] O Faraday propõe uma alternativa para este problema com as linhas. O Faraday faz o meio de campo entre a ação à distância e o campo. Por que as linhas aparecem? O Faraday não acredita que uma carga possa fazer força na outra estando longe, mas ele também não trabalha com a ideia de campo. A ideia de campo aparece muito no Maxwell. A ideia do Faraday é o seguinte: você tem uma carga e você tem outra. Essa carga não é capaz de fazer força nessa carga, ela só é capaz de fazer uma força nas partículas que estão contíguas à carga, muito próximas à ela (figura 4.4.3).

Figura 4.4.3: Ação à distância - aula 4 - [12:17]

Após contextualizar historicamente o aparecimento das linhas de campo, o professor mostra como ficam as linhas de campo para um carga em movimento uniforme, dizendo que

ocorre uma alteração em relação à simetria: *'ao invés de terem uma simetria esférica, elas tendem a se concentrar numa simetria cilíndrica'* [15:37]. Com esta explicação, juntamente com desenhos feitos na lousa, o professor encerra a tarefa 1, no instante [16:50].

• **Comentários:**

Durante o cumprimento da tarefa 1, observamos alguns aspectos em relação à componente da I.D. *Significação*. A apresentação das linhas de campo feita pelo professor foi apoiada em argumentos de cunho filosófico-histórico e não, no aspecto matemático da expressão do campo elétrico. Um dos seus desenhos pode sugerir que o campo da 1ª carga está vinculado à 2ª carga, não transmitido a ideia da existência das linhas em todo o espaço. A construção do significado das linhas de campo estava prevista neste início, para no desenvolvimento da aula, estas mesmas linhas serem deformadas com a aceleração.

* * *

Tarefa 2: Discutir o caso da desaceleração da carga, a bolha de informação e fazer o desenho da deformação das linhas de campo

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [20min - 40min]

Intervalo do professor: [17min - 28min]

Componentes da I.D.: *Significação*

Estava prevista na tarefa 2, a construção do desenho que representa a situação de uma carga em movimento que pára, ao bater em um obstáculo. Este desenho envolve a discussão e interpretação dos significados das regiões que se formam no espaço e das linhas de campo em cada uma delas.

O professor cumpre esta tarefa no intervalo de [16:55 - 28:00] e inicia sua explicação construindo as duas esferas que delimitam as duas regiões do espaço ao redor da carga. Ele desenha uma esfera com centro na carga, dizendo que é uma bolha de informação que se propaga com a velocidade da luz, separando o espaço em duas regiões, a que recebeu a informação que a carga parou e a que ainda *'acha'* que a carga está em movimento. A primeira esfera está mostrada na figura 4.4.4(a). A seguir, ele desenha uma 2ª esfera, mostrada na figura (b), dizendo que corresponde a uma região de transição. Após fazer o desenho, no trecho seguinte [21:10 - 21:52], ele comenta que a zona de transição corresponde ao tempo de desaceleração da carga.

(a) desenho 1ª esfera [20:36]

(b) desenho 2ª esfera [21:09]

Figura 4.4.4: Construção das regiões ao redor da carga

O próximo passo à construção das duas esferas foi desenhar as linhas de campo nestas regiões. Na mesma explicação, após o desenho das 3 regiões estar feito, o professor faz representação das linhas de campo na 1ª esfera, com o seguinte discurso:

[22:05 - 23:25] Como que ficam as linhas de um carga nessa situação? Se eu estou aqui dentro, eu sei que a carga parou, não sei? Como é que são as linhas de força de uma carga parada? São simétricas em relação à carga, então, eu vou ter que fazer assim (faz o desenho das linhas dentro da bolha). Elas são distribuições de um carga que já parou. Aqui fora, eu ainda acho que a carga está em movimento. Então, eu que estou aqui fora, para mim, eu não vejo essa carga aqui né? (aponta para a carga que parou dentro da 1ª esfera) Porque como eu estou aqui fora, eu ainda não recebi a informação que ela parou, para mim é como se essa carga estivesse continuando a andar. Para mim, é como se essa carga estivesse aqui (faz o desenho de um ponto na frente do ponto da carga parada). Para mim ela está andando ainda, eu não vi que ela parou, a bolha de informação não chegou para mim ainda.

Após esta fala, o professor desenha um ponto à frente da carga, diz que as linhas na região externa são mais concentradas e começa a desenhá-las ligando com o ponto 'azul', do seu desenho na lousa, que mostramos na figura 4.4.5. Em seguida, o professor liga as linhas de campo das regiões interna e externa à bolha, com a seguinte fala:

[24:27 - 24:55] Agora o que eu vou fazer? Eu vou ligar essas linhas da carga parada com a zona de transição. Então eu vou ter uma coisa assim olha. Essa aqui do meio eu vou desenhar assim... (passa para as linhas de baixo) Essa aqui é assim, essa aqui e essa aqui...

Figura 4.4.5: Linhas de campo - [23:51]

Após o professor completar o desenho com as linhas na zona de transição, uma aluna se manifesta com uma dúvida e o diálogo entre os dois está transcrito abaixo.

[25:32 - 27:00] Aluna: Estar a carga em repouso e estar a carga em movimento com essas linhas simétricas ou concentradas... isso foi obtido matematicamente...

Prof.: Matematicamente pelas equações de Maxwell

Aluna: a partir de um teor... um princípio...?

Prof.: As quatro equações, né?

Aluna: um princípio de que precisaria existir essas linhas para que uma carga interagisse com a outra... ou a linha é a decorrência desse estudo...

Prof.: a linha é uma tentativa histórica... uma vez um aluno me fez essa pergunta... mas peraí... quando você pega as equações de Maxwell, ela só fala de campo, não fala de linha. Mas a linha é uma tentativa de fazer a... e existe essa tentativa de fazer comunicar essas duas formas de enxergar a natureza porque a gente sabe que uma propriedade da linha é que o campo é tangente à linha. Então eu posso traçar... imaginar as linhas, ver como é que são os campos e aí sim desses campos, aplicar as leis de Maxwell e ver como elas se comportam. Então dá para dialogar as duas formas de... apesar do eletromagnetismo... é que hoje o eletromagnetismo incorporou a ideia de linha, mas historicamente nasceu apartado.

Com este diálogo entre o professor e a aluna, a tarefa 2 é finalizada e o desenho das linhas de campo ao redor da carga nas três regiões está completo.

- **Comentários:**

No cumprimento da tarefa 2, observamos ocorrências na componente *Significação*, durante a explicação do desenho das linhas de campo de uma carga em movimento que atinge um obstáculo e pára. Observamos ao longo da sua construção algumas quebras de raciocínio que justificam o desenho, em duas situações. A primeira, no instante em que ele desenha a região de transição antes de mencionar a razão pela qual ela existe e a segunda, no momento em que ele liga as linhas de campo dentro e fora da 'bolha', também, deixando de fornecer o porquê das linhas serem contínuas. Estas pequenas desconexões, durante a construção do desenho, podem ter prejudicado a *Significação* das linhas de campos, o que seria fundamental neste ponto do curso, pois a intenção desta aula é mostrar, em seguida, as suas deformações e que elas tem inércia.

* * *

Tarefa 3: Discutir que na região de transição $\partial \vec{E}$ gera $\vec{B}$, o que corresponde a uma onda eletromagnética que se propaga. Mostrar o simulador radiation 2D

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [40min - 60min]

Intervalo do professor: [29min - 33min]

Componentes da I.D.: *Significação e Ordenamento*

Nesta tarefa, estava planejado interpretar e atribuir um significado físico àquela região de transição, onde as linhas de campos são diferentes das linhas interna e externa à bolha de informação. A previsão era apresentar que as deformações do campo $\vec{E}$ geram, nesta região, um campo $\vec{B}$ e que estes dois campos, se propagando, constituem uma onda eletromagnética.

O professor cumpre esta tarefa no intervalo [29min - 33min] e inicia mostrando o simulador *Radiation 2D*, no trecho [29:06 - 31:00]. Enquanto mostra no computador, mexendo com o mouse, fez os seguintes comentários:

[29:10 - 31:00] Este programa simula todas as situações possíveis que a gente tem com as linhas conforme o movimento da carga. Então, por exemplo, eu vou escolher uma trajetória com o mouse. Então, se eu fizer assim ó, a carga vai acelerar e ele mostra como as linhas se comportam. Se eu fizer assim ó... né? Agora, por exemplo, eu posso colocar uma situação... a oscilação de um dipolo... (um minuto em silêncio) ... para qualquer configuração que a gente fizer... tem outras situações aqui que eu posso simular... posso colocar a carga para oscilar em círculo... Depois a gente vai ver... agora eu vou comentar uma coisa que acontece na zona de transição.

Em seguida, ele parte para a lousa, circula a região de transição do desenho feito

anteriormente, conforme mostrado na figura 4.4.6, e inicia a discussão perguntando 'o que ocorre nessa região?'.¹

Figura 4.4.6: Interpretação da região de transição - [31:19]

Seu discurso ocorre em cima do fato de haver uma variação na direção do campo $\vec{E}$ e ele atribui esta variação à desaceleração da carga. Ele coloca a variação do campo elétrico na forma matemática, como $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$, gerando um campo magnético que também varia no tempo, gerando, por sua vez, um outro campo $\vec{E}$, conforme mostrado na figura 4.4.7. Rapidamente o professor diz que estas variações de $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são ondas eletromagnéticas e que é assim que se produz ondas eletromagnéticas: 'freando e acelerando cargas'. Com isto, a tarefa 3 é finalizada.

Figura 4.4.7: Interpretação da região de transição - [32:17]

- **Comentários:**

Durante esta tarefa, houve ocorrências nas componentes *Ordenamento* e *Significação*. Estava previsto caracterizar a região de transição, mostrando que as ondas eletromagnéticas são geradas ali para, depois, mostrar o simulador de radiação. O professor inverte esta ordem e mostra o simulador antes de atribuir o significado daquela região com as linhas deformadas. Por isso, houve uma ocorrência na componente *Ordenamento*.

Sobre o uso do simulador, estava planejado mostrar a deformação das linhas de campo em várias situações, discutindo as posições das linhas e da carga. Com a imagem na tela é possível ver todo o desenho feito na lousa pelo professor na tarefa anterior, dando maior significado a tudo que tinha sido construído, através de uma abordagem mais visual. Havíamos previsto discutir os casos da carga em: movimento uniforme, parando em um obstáculo, movimento oscilatório (MHS) e movimento circular. Observamos que a apresentação do simulador feita pelo professor foi em silêncio. A inversão da ordem na apresentação das ideias, parece ter travado a discussão do professor, porque o simulador mostra a produção de ondas eletromagnéticas e, no momento da aula que o professor o mostrou, ele ainda não havia falado que a região de transição estava relacionada com a criação da radiação. Com isso, ele não pôde explorar a potencialidade do simulador e discutir o funcionamento da radiação, enfraquecendo a *Significação* dos conceitos envolvidos.

* * *

Tarefa 4: Mostrar que a 3ª lei de Newton não vale para essa situação

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [60min - 90min]

Intervalo do professor: [33min - 94min]

Lacunas da I.D.: *Re-significação* e *Epistemologia*

A quarta tarefa desta aula é a primeira de **tipo fim** e a intenção era mostrar as forças elétricas em duas cargas na situação apresentada na lousa, onde as linhas de campo tem direções diferentes em cada região do espaço. Inicialmente, estava prevista um atividade para os alunos tomarem conhecimento deste caso e, a seguir, o professor faria a discussão para a sala, mostrando que a 3ª lei de Newton possui uma limitação.

O cumprimento desta tarefa 4 ocorre no intervalo de [33min - 94min] e é iniciada com a distribuição da atividade 4A prevista no *manual de instruções*. Ao encerrar a atividade com os alunos, no instante [1:20:15], o professor solicita a atenção de todos à lousa e retoma

sua aula. Ele mostra durante o trecho [1:22:15 - 1:25:42] que as forças elétricas entre duas cargas puntiformes em repouso obedecem à 3ª lei de Newton, pois tem mesmo módulo, mesma direção e sentidos opostos, e diz que estas características são necessárias para que o par de forças seja ação e reação.

Após reconstruir na lousa o primeiro exercício da atividade 4A, que trata de colocar as forças em duas cargas paradas, ele faz o seguinte comentário:

[1:25:20 - 1:25:57] Uma das condições para as forças serem ação e reação é elas terem mesma direção, mesmo sentido. Se eu encontrar um par de forças que não tem ou o mesmo valor, ou o mesma direção ou sentidos opostos, eu posso dizer que este par de forças não respeita a 3ª lei de Newton, porque a lei da ação e reação me garante isso.

Figura 4.4.8: Demonstração do par ação-reação para duas cargas em repouso - [1:25:41]

Dizendo isto, ele recapitula o desenho da bolha de informação, toma uma linha como exemplo da figura já feita na lousa, que mostramos na figura 4.4.9, e fala que para aquela situação o par de forças não tem a mesma direção.

Após o professor dizer que a 3ª lei de Newton não vale para o caso da radiação, diz que o eletromagnetismo mostrava a limitação da mecânica newtoniana. Neste momento, duas alunas interrompem o professor e questionam se Newton tinha se referido às cargas com a 3ª lei ou se apenas tinha anunciado sua lei para as massas. O professor confirma que Newton só se preocupou com as massas, já que '*a eletricidade é mais tardia*'. As alunas insistem dizendo que a limitação da 3ª lei de Newton é para o eletromagnetismo e não para as massas, pois '*Newton enunciou para as massas*'. Uma delas ainda pergunta: '*mas*

usaram a 3ª lei de Newton de maneira geral?'. O professor responde:

[1:30:40 - 1:30:57] Mas a gente usa, não usa? (se refere ao uso da 3ª lei de maneira geral) Na verdade, a gente estendeu a mecânica newtoniana a domínios que talvez não fossem os dela.

Figura 4.4.9: Uma linha de campo - [1:28:55]

A mesma aluna ainda questiona o fato de tratarmos o problema da força entre cargas no ensino médio como um par ação-reação, já que para cargas a força pode ser atrativa ou repulsiva e para as massas a força é apenas atrativa. Ao final desta pequena discussão, outra aluna retoma o desenho da lousa e pergunta '*então, essas forças não constituem um par ação-reação?*'. O professor confirma dizendo que as duas cargas sentem força, mas estas forças não são um par ação-reação e encerra comentando que '*este ponto é importante de se investigar, porque Newton falou de massa e não de carga e talvez a gente tenha estendido a mecânica para domínios que não fossem os dela*' [1:32:52].

• Comentários:

Observamos ao longo do cumprimento da tarefa 4, ocorrências relacionadas às componentes *Epistemologia* e *Re-significação*. Esta tarefa está relacionada à ideia de lei, já que nossa intenção era 'quebrar' a 3ª lei de Newton. Observamos no trecho que transcrevemos [1:25:20 - 1:25:57], o professor coloca que se existir um par de forças que não tem as tais características, eles não constituem um par ação-reação. Nossa intenção era mostrar a

invalidade da 3ª lei de Newton e não dizer que existe um exemplo que não obedece a lei. Esta fala parece sugerir que é possível existir casos na natureza fora da lei. Nesta tarefa, a intenção era *re-significar* a 3ª lei de Newton e mencionar aspectos gerais sobre o significado de uma lei em física.

* * *

Tarefa 5: Discutir a conservação do momento nesse caso e enfatizar que onda carrega momento

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [90min - 120min]

Intervalo do professor: [94min - 107min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento, Epistemologia e Re-significação*

A tarefa 5 é considerada o fechamento da aula 4 e, também, de *tipo fim*. Seu principal objetivo é mostrar que a conservação do momento se mantém e que a existência da radiação na região de transição garante esta conservação. Com isso, é prevista a ênfase ao fato que onda carrega momento e tem inércia.

O professor cumpre esta tarefa no intervalo de [94min - 107min] e inicia dando continuidade à tarefa anterior, se refere ao ensino da 3ª lei no ensino médio, dizendo que os professores tratam ela como sinônimo da conservação da quantidade de movimento. Ele dá o exemplo clássico da conservação do momento dos patinadores, falando que isso é a 3ª lei de Newton. O professor afirma que ao ensinar este tópico, os professores tratam conservação de momento e 3ª lei de Newton como sinônimos. A seguir, pergunta se '*caindo a 3ª lei de Newton, a conservação cai junto?*' Ele anuncia a resposta, dizendo:

[1:35:37 - 1:35:52] A conservação da quantidade de movimento não cai junto com a 3ª lei de Newton. Lembra que eu falei na primeira aula do teorema de Nöether? Do que está relacionada à quantidade de movimento do sistema? Está relacionado com a simetria do espaço. E aí, o que acontece? Esta lei não cai (se refere à lei da conservação de $\vec{p}$).

Em seguida ao trecho acima, o professor mostra um slide do powerpoint, com algumas ideias e volta para trás na explicação, afirmando:

[1:35:53 - 1:36:24] Então, existe um alinhamento que a gente tradicionalmente faz, epistemológico, entre a conservação da quantidade de movimento e a lei da ação e reação. Na verdade, o que o eletromagnetismo está mostrando para a gente é que, do ponto de vista de profundidade, do que diz sobre a natureza, a conservação da quantidade de movimento é uma lei mais fundamental do que a 3ª lei de Newton. Ela é mais profunda do ponto de vista epistemológico. Ela é mais basal do ponto

de vista da física.

Ele afirma que mesmo quebrando a 3ª lei, a conservação é mantida e lê o que estava escrito no seu slide, mostrado na figura 4.4.10.

Figura 4.4.10: Slide mostrado pelo professor implementador - [1:36:16]

Retomando o desenho da bolha, '*analisando a situação da carga*', ele diz que existe uma quantidade de movimento que deve estar perdida. Se a conservação continua valendo, pergunta para onde vai a variação da quantidade de movimento deste sistema. '*Sumiu? Para onde ela foi? Se a carga parou, quem carregou esta quantidade de movimento?*' [1:37:17]

Ele anuncia, em seguida, que quem carregou a quantidade de movimento foram as ondas eletromagnéticas produzidas na região de transição. O professor faz esta discussão no trecho [1:38:00 - 1:38:58], relembrando o problema do espelho feito na aula passada (na semana anterior), que as ondas transferem momento para o espelho. Ainda diz que a quantidade de movimento se conserva pelo fato da onda carregar momento e que, ao quebrar uma lei, outra se mantém. Ele inicia uma discussão epistemológica sobre o significado das leis da física, que transcrevemos abaixo, o que dura até o final da aula - cerca de 8 minutos. Com isso, nestes minutos finais da aula, o professor suscita uma discussão filosófica e opta abordar problemas gerais.

[1:39:00 - 1:41:00] Então, eu quebro uma lei... isso é uma discussão muito interessante para a gente fazer com nossos alunos, porque eu acho que a gente fala pouco sobre essas coisas, né? Eu tenho

um palpite, na verdade eu nunca estudei isso do ponto de vista mais formal... eu acho que a nossa fala, a maneira como a gente aborda os conceitos na sala de aula, progressivamente constrói na cabeça do aluno uma visão equivocada do que é ciência. Muitas vezes porque a gente tem uma visão equivocada... E aqui é uma situação interessante de se discutir, do ponto de vista da filosofia da ciência... E agora, o que eu faço com a Mecânica Newtoniana? Encontrei um furo, né? A gente não joga fora a MN, porque tem uma série de... então, é interessante a gente mostrar isso porque isso permite a gente introduzir na sala de aula uma série de discussões do ponto de vista da filosofia da ciência. Quando uma teoria encontra um problema, uma anomalia como Thomas Kuhn chama na 'Estrutura das Revoluções Científicas', o que a gente faz com essa anomalia, joga a teoria fora? Não né... a princípio a gente faz modificações na teoria para poder dar conta das anomalias. Algumas modificações para tentar acomodar essas perturbações. Aliás, essa situação aqui, de algum modo, se vocês lerem Kuhn, ele fala da mudança de paradigma. E aqui a gente tem um exemplo interessante... apesar da gente ter encontrado uma limitação da MN, a gente não substitui a MN por uma outra... a gente continua trabalhando com a MN, mas sabe quais são os limites que a gente pode usá-la. Isso não tira o mérito incrível que a mecânica tem para descrever...

• Comentários:

Observamos durante o cumprimento desta última tarefa, ocorrências relacionados às componentes *Ordenamento*, *Epistemologia* e *Re-significação*.

A inversão de ideias aconteceu nos momentos iniciais da tarefa 5. Após mostrar a invalidade da lei de Newton, o professor já anuncia a questão da conservação da quantidade de movimento, sua relação com a lei de Newton e que o momento se conserva. Esta previsto colocar o 'problema' da invalidade da lei e criar uma tensão intelectual, advinda da ruptura entre os conceitos já estabelecidos dentro dos alunos. O professor apresenta a solução da conservação do momento antes de criar esta tensão, invertendo o *Ordenamento*.

No final desta aula estava previsto fazer uma discussão sobre a relação entre massa, momento e energia. Essa discussão tinha o objetivo de amarrar os conceitos dados anteriormente e dar sentido a tudo que foi exposto, iniciando a desconstrução da massa newtoniana, mostrando que as propriedades da inércia e momento são da energia, já que a radiação é portadora de inércia e momento mesmo sem ter massa. O professor opta por fazer discussões filosóficas gerais, deixando de re-significar o momento e a inércia.

Resultados da Aula 4

Podemos ver no quadro geral 4.4.1, mostrado no início da descrição da aula 4, que as componentes que observamos foram o *Ordenamento*, a *Significação*, a *Epistemologia* e a

Re-significação. A seguir, mostramos na figura 4.4.11, o quadro que sintetiza o resultado da análise da aula 4.

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	T3 e T5	2
<i>MAT</i>	-	-
<i>SIG</i>	T1, T2 e T3	3
<i>EPI</i>	T4 e T5	2
<i>RE-SIG</i>	T4 e T5	2

Figura 4.4.11: Desempenho do prof. na aula 4

Em relação à componente *Ordenamento*, houve ocorrências durante as tarefas 3 e 5. A componente *Significação* apareceu três vezes, durante as tarefas 1, 2 e 3. Por fim, as componentes *Re-significação* e *Epistemologia* apareceu duas vezes, nas tarefas 4 e 5.

4.5 Análise da Aula de Relatividade

A aula de Relatividade que analisamos foi a de número 6, a segunda deste contexto. Ela apresenta o quadrimomento, para chegar ao conceito de massa relativística e à equivalência massa-energia. O previsto é iniciar pela definição do quadrimomento e discutir o significado da sua 4ª componente. Esta aula é considerada a mais importante e o ponto alto do curso, pois nela apresentamos a famosa fórmula do Einstein e a massa, como m invariante relativístico. As tarefas previstas para esta aula foram apresentadas na seção 4.2.

A lista de tarefas da figura 4.5.1 é uma síntese dos *momentos sugeridos* ao professor, contidos no *manual de instruções*. Inserimos o tempo previsto para cada uma delas, da mesma maneira que fizemos na análise das aulas anteriores. O tempo real da aula dada pelo professor está no eixo vertical da direita. Nesta aula estava prevista a atividade 6 para os alunos, inserida na tarefa 4.

Aula 6 - Relatividade: Massa e Energia		Duração: 1 h 23 min = 83 min		
nº	lista de tarefas	classif. das tarefas		componentes da I.D.
1	Retomar a tarefa feita em casa e discutir o problema da indução em referenciais diferentes (espira e o ímã)	0 15 meio	0 4 min	SIG
2	Definir o quadrimomento na relatividade restrita a partir do tempo próprio	35 meio	16 min	ORD MAT SIG
3	Discutir o significado da 4ª componente do momento e chegar no conceito de energia em dois referenciais diferentes.	55 fim	30min	ORD RE-SIG
	Significado: $E = mc^2$ e $E = \gamma mc^2$	M. E.		
4	Calcular o p^2 (produto escalar p.p) e chegar na massa invariante . Atividade 6	105 fim	52min	MAT RE-SIG ORD
	Significado: Massa é invariante relativístico	M. E.		
5	Discussão epistemológica e ontológica sobre a massa e a energia, percorrendo e interpretando todos os resultados apresentados	120 fim	83min	RE-SIG ORD
	Significado: Inércia e Peso da Energia	M. E.

tempo do manual
tempo da aula

Figura 4.5.1: Distribuição das componentes - aula 6

De maneira geral, a aula transcorreu bem e o professor cumpriu todas as tarefas num tempo inferior ao previsto. Sua aula teve a duração de 1h23min e observamos ocorrências nas componentes *Ordenamento*, *Matemática*, *Significação* e *Re-significação*. A figura 4.5.1 indica a componente da I.D. em que houve algum desvio em relação ao previsto e, também, o intervalo da aula em que ele ocorreu.

Descrição das Componentes Observadas

Tarefa 1: Retomar a tarefa feita em casa e discutir o problema da indução do ímã e da espira em referenciais diferentes

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [0 - 15min]

Intervalo do professor: [0 - 4min]

Componentes da I.D.: *Significação*

A tarefa 1 consiste em comentar a atividade recomendada para fazer em casa e revisar os conceitos invariantes da relatividade, apresentados na aula anterior. A tarefa de casa era uma lista de exercícios longa e tratava de exemplos em que os alunos podiam mexer com os conceitos abordados na primeira aula de relatividade. O professor deveria comentar o último exercício da lista, que tratava do problema clássico do ímã e da espira. Estava prevista esta discussão para dar maior significado aos invariantes apresentados na aula anterior, principalmente ao conceito de evento e à mudança de referencial.

O professor cumpre a primeira tarefa no intervalo de [0 - 4:00] e inicia a aula retomando os invariantes da aula anterior, conforme o previsto. Ele se utiliza de um slide, que mostramos na figura 4.5.2. Após citar os invariantes, anuncia que a aula daquele dia apresentará mais um deles na relatividade e, em pouco mais de 3 minutos, ele encerra a tarefa 1.

Figura 4.5.2: Slide mostrado no início da aula 6 - [1:43]

• Comentários:

Durante a tarefa 1, o professor implementador deixou de fazer a discussão do problema do ímã e da espira, que estava prevista no *manual de instruções*, com a finalidade de promover a significação dos conceitos de evento, mudança de referencial e absoluto. Por isso, consideramos que, nesta tarefa, houve uma ocorrência na componente *Significação*.

Tarefa 2: Definir o quadrimomento na relatividade restrita a partir do tempo próprio

Classificação: tipo meio

Intervalo previsto: [15min - 30min]

Intervalo do professor: [4min - 16min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento, Matemática e Significação*

Estava prevista na tarefa 2, a dedução do momento na relatividade restrita, que envolvia aspectos matemáticos e algumas justificativas, baseadas nas transformações de Lorentz e no tempo próprio.

O professor cumpre esta tarefa 2 no intervalo de [3:40 - 15:52] e inicia seu discurso anunciando que o momento na relatividade deve ter quatro componentes. Ele mostra um slide com a definição de momento na física clássica e transpõe as mesmas fórmulas para a relatividade. Em seguida, pergunta se estas expressões podem valer para dois referenciais diferentes. Neste momento, ele 'clica' no slide e aparecem as mesmas fórmulas neste outro referencial, porém, com um 'X' em cima, sugerindo uma negação. O slide é mostrado na figura 4.5.3. Ele continua seu discurso, ignorando o slide que denuncia a resposta 'não'. Somente após completar seu raciocínio, se refere ao 'X' do slide, dizendo que não é possível usar as mesmas equações em outro referencial.

Figura 4.5.3: Slide com 'X' - [5:44]

Em seguida, o professor diz que as expressões apresentadas não podem ser usadas na relatividade restrita, argumentando:

[5:56 - 6:30] Isso aqui é problemático do ponto de vista da operacionalidade do cálculo. Por quê é problemático? Porque quando a gente calcula essas derivadas na relatividade restrita, a gente está derivando em relação ao tempo, só que o tempo na teoria da relatividade é um relativo (mostra as transformações de Lorentz). Então, você imagina a gente calcular da derivada da posição em relação ao tempo de João, sendo que o tempo de João é isso aqui (aponta para a expressão $t^J = \gamma(t^M - \frac{v}{c^2}y^M)$) Isto torna a tarefa um pouco inglória do ponto de vista matemático.

Após este trecho, ele relembra que o momento deve ter quatro componentes e repete que *'a gente tem dificuldade de calcular essas derivadas com o tempo relativo'*[7:35] e apresenta esta frase no seu slide. Diz que Minkowski propõe a solução e inicia o cálculo das quatro componentes do momento em dois referenciais diferentes. Sua dedução ocorre no intervalo [8:08 - 10:23] e é feita usando apenas o slide, mostrado na figura 4.5.4.

Figura 4.5.4: Dedução do quadrimomento - [9:55]

Ele passa, em seguida, para o cálculo das coordenadas em relação ao tempo próprio e, consequentemente, reexplica o que ele é, dizendo:

[12:27 - 12:46] Lembra o que eu falei a semana passada? O tempo próprio é uma dimensão supra-temporal do tempo. Quer dizer, né... é uma coisa que está aí. Eu vou arriscar a minha interpretação: é o absoluto do Newton. É o tempo que flui independente de qualquer coisa. Quando o tempo próprio se manifesta como tempo relativo? Quando os referenciais começam a se deslocar.

Após este comentário, ele mostra rapidamente o cálculo das derivadas no seu slide e já introduz os resultados nas quatro componentes do momento, em dois referenciais, como no slide mostrado na figura 4.5.5.

Relatividade: Energia e Massa C, eventos, c^2 , τ - absolutos na RR

João	Maria
$p_x^J = m \frac{dx^J}{d\tau} = m \frac{dx^J}{dt^J} \frac{dt^J}{d\tau} = \gamma m v_x^J$	$p_x^M = m \frac{dx^M}{d\tau} = m \frac{dx^M}{dt^M} \frac{dt^M}{d\tau} =$
$p_y^J = m \frac{dy^J}{d\tau} = m \frac{dy^J}{dt^J} \frac{dt^J}{d\tau} = \gamma m v_y^J$	$p_y^M = m \frac{dy^M}{d\tau} = m \frac{dy^M}{dt^M} \frac{dt^M}{d\tau} =$
$p_z^J = m \frac{dz^J}{d\tau} = m \frac{dz^J}{dt^J} \frac{dt^J}{d\tau} = \gamma m v_z^J$	$p_z^M = m \frac{dz^M}{d\tau} = m \frac{dz^M}{dt^M} \frac{dt^M}{d\tau} =$
$p_t^J = m c \frac{dt^J}{d\tau} = mc \frac{dt^J}{d\tau} = \gamma mc$	$p_t^M = mc \frac{dt^M}{d\tau} = mc \frac{dt^M}{d\tau} =$

S^J - partic. com velocidade v
mesmos eventos E_2 e E_1

S^M - partic. em repouso
dois eventos quaisquer E_2 e E_1

Figura 4.5.5: Slide completo com o quadrimomento - [15:22]

Sua explicação toda ocorre no intervalo de [8:08 - 15:50], durando aproximadamente 8 minutos. Com isso, a tarefa 2 é encerrada.

• Comentários:

No cumprimento da tarefa 2, houve ocorrências relativas às componentes *Ordenamento*, *Significação* e *Matemática*. No início desta tarefa, o *Ordenamento* apareceu, quando o professor apresenta o porquê das expressões do momento clássico não poderem ser usadas na relatividade, antes de o problema ter sido enunciado. Seu discurso ia numa direção e quando clicou para mudar o slide, apareceu o 'X' como resposta antes do problema[5:40].

Logo em seguida, verificamos uma ocorrência na *Significação*, pois sua justificativa para o não uso das expressões do momento clássico é baseada na dificuldade matemática de deduzir as derivadas em relação ao tempo relativo, ao invés de enfatizar a covariância das equações.

Além destas duas componentes, houve uma ocorrência em relação à *Matemática*. O professor implementador não fez as deduções matemáticas na lousa, como previsto, mas sim, as apresentou nos slides.

* * *

Tarefa 3: Discutir o significado da 4ª componente do momento e chegar no conceito de energia em dois referenciais diferentes.

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [35min - 55min]

Intervalo do professor: [16min - 30min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento e Re-significação*

A tarefa 3 é a primeira de **tipo fim** da aula 6 e é considerada fundamental, pois consiste em interpretar a 4ª componente do quadrimomento, como sendo energia. Após mostrar que esta componente de p está relacionada com a energia, a tarefa continua com a apresentação da energia de uma partícula em dois referencias diferentes, um deles em que ela está em repouso e outro, em movimento. Após isto ser mostrado, está previsto, também, discutir o significado das duas expressões $E = mc^2$ e $E = \gamma mc^2$, já que elas são o objetivo principal do curso inteiro.

O professor cumpre esta tarefa no intervalo [15:54 - 30:30] e sua primeira ação é mostrar um slide com as quatro componentes do quadrimomento e dizer que a componente p_t é uma que devemos pensar. Neste slide, aparece uma 'informação' que anuncia que p_t está relacionada à energia, conforme podemos ver na figura 4.5.6. Entretanto, o professor continua discursando sobre o significado do momento clássico, ou seja, sobre as três primeiras componentes de p . Após retomar as propriedades dele, durante aproximadamente 2 minutos, ele questiona sobre o significado da quantidade de movimento na direção temporal e diz que vai mostrar que esta grandeza está associada à energia. Ele diz: '*de alguma forma vão aparecer as manifestações da energia, tanto a de repouso como a energia cinética do corpo. Eu vou mostrar isso...*'[18:15].

Figura 4.5.6: Slide: 4ª componente de p - [16:13]

O professor começa sua demonstração expandindo γ em série de Taylor, com dois termos. Em seguida, substitui o resultado em p_t , chegando à expressão $p_t = mc + E_C/c$ e opta por destrinchá-la, multiplicando todos os termos por c e analisar o significado de cada um deles. A figura 4.5.7 mostra parte da sua ação na lousa.

Figura 4.5.7: Slide: 4ª componente de p - [26:31]

O professor explica cada termo da expressão obtida, dizendo:

[26:16 - 26:55] Veja, isto aqui (se refere ao termo ' cp ' que está circulado), de alguma forma é a energia... vocês já devem ter visto na literatura que é a energia do fóton, que é o momento vezes a velocidade: ' E ' é igual ao momento vezes ' c '. O fóton não tem massa. Isso de alguma forma tem componente dimensional de energia (se refere ao 1º termo ainda). E vejam que isso aqui tem duas componentes (se refere, agora, aos outros dois termos do lado direito da equação). Um componente aqui (aponta para mc^2) e o outro é a energia cinética. A energia cinética a gente sabe que é a energia associada ao movimento. Essa componente aqui (aponta para mc^2), de alguma forma, está relacionada com alguma coisa que a partícula tem intrínseca a ela, independente do movimento. Percebe? Então, já dá para perceber que tem energias envolvidas aqui.

O professor continua a explicação, deduzindo $E = mc^2$ a partir do momento, num referencial em que a partícula está em repouso. Em seguida, faz o mesmo para um referencial em que uma partícula está em movimento. Neste momento da aula, ele deixa claro que a segunda expressão é mais geral que a primeira, e mostra que para $v \ll c$, $\gamma \rightarrow 1$ e a segunda expressão cai na primeira. Ele encerra a tarefa 3, com o seguinte comentário:

[29:36 - 30:26] E aqui, de alguma forma, está estabelecido matematicamente o que a gente está construindo ao longo do curso, que é a relação intuitiva entre a massa e a energia. A gente foi mostrando ao longo do curso que os atributos da mecânica newtoniana foram passando para a energia aos poucos. A ideia da inércia, da atratibilidade, transferir momento... o eletromagnetismo do século

19 começa a perceber esta característica que a energia tem e o Einstein formaliza matematicamente isto quando ele escreve esta equação $E = mc^2$.

• **Comentários:**

Nesta tarefa, houve ocorrências nas componentes *Ordenamento* e *Re-significação*. A primeira componente *Ordenamento* apareceu quando ele anuncia no slide que p_t está relacionado à energia e continua explicando as três primeiras componentes do momento. O previsto era mostrar primeiro a expansão do fator γ em série, para que os alunos percebessem nela o termo que representa a energia cinética clássica.

Em seguida, na análise da expressão $c p = mc^2 + E_C$ feita pelo professor, observamos um discurso que aponta uma ocorrência na *Re-significação*. Ele introduz a a energia do fóton não prevista, que se torna um elemento complicador, pois o fóton é desprovido de massa. Além disso, o seu comentário sobre o termo ' mc^2 ' precipitou a entrada da energia relativística, que estava prevista para ser introduzida após a interpretação de p_t como energia [26:16 - 26:55].

* * *

Tarefa 4: Calcular o p^2 (produto escalar $p.p$) e chegar na massa invariante. Ativid. 6

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [45min - 105min]

Intervalo do professor: [30min - 52min]

Componentes da I.D.: *Matemática, Re-significação e Ordenamento*

A tarefa 4 também é de **tipo fim** e consiste em fazer o produto escalar do quadrimomento e chegar ao último invariante relativístico: a **massa**. Após esta dedução, está previsto discutir o significado deste resultado. Esta discussão envolve *re-significar* a massa, já que ela ganha status diferente na relatividade restrita. Esta tarefa deve ser encerrada com a atividade 6, para os alunos refletirem sobre as grandezas conhecidas da mecânica e o novo status que algumas delas adquirem com a relatividade de Einstein.

O professor cumpre a tarefa no intervalo [30:30 - 52:02] e inicia dizendo que falta mostrar mais um invariante na teoria. Um aluno interrompe e volta para a expressão $E = \gamma mc^2$, perguntando: '*essa fórmula (se refere à $E = mc^2$) aparece como a mais famosa dele. Se ela não é geral, só vale para partículas paradas, por que ela não aparece com o γ na frente?*'[31:06]. O professor responde ao aluno, dizendo que pode ser uma questão de

transposição didática do tema e que explicar o que seria o fator γ para um público leigo seria praticamente impossível.

Sua resposta gera na sala a participação de outros alunos. Uma aluna 'desabafa' sobre seu entendimento do que foi falado no curso, a confusão das grandezas relativas e absolutas e a dificuldade de digerir tudo isso. Ela ainda complementa: *'quando a gente se convence de tudo isso, tudo bem... a gente se convence e não consegue convencer ninguém! Você não consegue reproduzir uma linha de raciocínio que faça aquilo ter uma lógica de fácil compreensão. Como que se transpõe isso?'*[33:36]. Com a fala da aluna, o diálogo continua e transcrevemos um trecho dele [34:05 - 34:45].

Prof.: Uma coisa é você entender racionalmente, outra coisa é você sentir com o estômago, sentir lá dentro. Esse sentir... não sei vocês, eu não consigo sentir essas coisas que eu estou falando aqui. Porque a gente não tem experiência empírica. Você já pegou um ônibus próximo da velocidade da luz? A gente não tem essa vivência.

Aluna: E a garotada é mais abusada, eles falam 'professora, jamais isso vai acontecer'... e aí, você entra num dilema muito profundo: nem você se convenceu daquele jeito e você sabe que não tem argumento nenhum para convencer o outro.

A discussão coletiva perdura na sala por mais 4 minutos, com a participação de outros 3 alunos. Em seguida, o professor retoma a tarefa no instante [37:53], com o cálculo de p^2 , lembrando a todos que o produto escalar é uma 'máquina de invariantes'. Ele 'clica' no computador e aparece no slide o cálculo inteiro de p^2 , conforme mostramos na figura 4.5.8. A explicação vai sendo fornecida, conforme ele aponta para o slide.

$$p^2 = (p_t^J)^2 - (p_x^J)^2 - (p_y^J)^2 - (p_z^J)^2$$

$$\gamma^2 m^2 c^2 - \gamma^2 m^2 (v_x^J)^2 - \gamma^2 m^2 (v_y^J)^2 - \gamma^2 m^2 (v_z^J)^2$$

$$\gamma^2 m^2 (c^2 - (v_x^J)^2 - (v_y^J)^2 - (v_z^J)^2)$$

$$= \gamma^2 m^2 (c^2 - v^2)$$

$$= m^2 c^2$$

massa

Figura 4.5.8: Slide: dedução de p^2 - [39:31]

A apresentação é finalizada após 4 minutos, no instante [41:58], com o resultado $p^2 = m^2 c^2$ no slide. Ele pergunta para a sala *'o que isso me ensina?'* e retoma o raciocínio feito na aula anterior, para o intervalo relativístico e o tempo próprio ($e^2 = c^2 \tau^2$), comparando com o resultado de p^2 , para mostrar que a massa é invariante. Em seguida, afirma que a massa é uma invariante na relatividade restrita e parte para uma discussão sobre a concepção usual que a massa varia com a velocidade. O professor conduz esta discussão dizendo que a 'famosa' expressão $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, encontrada nos livros, traz uma concepção sobre massa de repouso.

Figura 4.5.9: Massa invariante - [43:59]

O professor comenta sobre esta fórmula e argumenta:

[43:53 - 44:26] Daí a dizer que esta equação está errada... não, ela não está errada. Ela precisa ser analisada com muito cuidado. Mas o fato é que se a massa é invariante, não faz sentido falar que um corpo tem uma massa de repouso. Talvez faça mais sentido dizer que o corpo tem uma energia de repouso. Talvez isso faça mais sentido porque... enfim... massa de repouso ou massa em movimento, a massa é a mesma... isso é uma coisa que merece uma discussão.

Em seguida a esta fala, o professor encerra seus comentários sobre a massa invariante. Porém, uma aluna questiona sobre a conversão de massa em energia e pergunta *'e aí, como a massa vai ser um invariante e a energia não?'* [45:55]. O professor responde:

[46:08 - 48:00] Talvez a gente precise alargar um pouco mais a nossa noção de massa. A gente tem uma noção de massa estritamente newtoniana, massa sólida, massa dura. Aliás, massa que nem Newton definiu direito. Eu falei antes, não sei se você se lembra, que a definição de Newton de massa é o maior 'gato' da história do conhecimento, Newton não define nada (...) Mas o fato é que, talvez

esse raciocínio ainda esteja um pouco preso na massa... newtoniana, né... porque a gente pensa assim... se eu acelerar uma partícula no acelerador, qual é a o raciocínio que a gente costuma fazer? Se ela está ganhando energia, essa energia vai se convertendo em massa. Você quase imagina um elétron ficando maior e ganhando corpo. Porque a massa dele vai crescer a medida que se aproxima... Essa construção que a gente faz na nossa cabeça talvez precise ser reformulada. Porque a gente vive no mundo do clássico de novo, mundo de massas fixas, massas duras, massas definidas,... e talvez no mundo da energia... talvez a energia sofra a variação relativística e ela se manifesta classicamente com um jeito que a gente traduz na mecânica newtoniana... mas isso tem limitações quando você passa de um modelo para outro (se refere de uma teoria para outra) ... na verdade, é um problema mesmo! Eu estou tentando levantar conjecturas... eu não tenho respostas para isso.

Após esta resposta, ele continua como reflexão em voz alta sobre a inércia, massa e energia de um corpo, que consideramos relevante transcrever.

[48:08 - 49:33] De novo é essa a questão... quando eu injeto energia, por exemplo, eu ponho um elétron num acelerador e eu acelero ele a 99% da velocidade da luz, ele está ganhando energia, então ele está ganhando massa. Aí acontece uma coisa dentro do acelerador que é estranha, você injeta energia numa partícula, ela se comporta como se ela não atingisse a velocidade da luz... ela resiste a atingir a velocidade da luz. Você injeta energia, ela converte parte dessa energia... vamos usar a terminologia antiga, em massa, aumenta a inércia e aí aquela energia que você injetou não é suficiente para ela chegar à velocidade da luz. Aí você injeta mais. Ela converte, aumenta a en... então, essa é a questão que a gente precisa fazer aqui. Esse é o raciocínio tradicional que um professor de física tem. A questão é: essa inércia, nós vamos falar isso daqui a pouco... será que a inércia é um atributo da massa ou será que a inércia é um atributo da energia e que se manifesta na massa do mundo clássico? A gente diz que um corpo de 10kg tem mais inércia que um de 5kg. Talvez a inércia não esteja na massa, talvez a inércia esteja na energia.

O professor encerra a tarefa com esta discussão, afirmando '*que a gente (ele se inclui) tem uma tendência de imaginar um elétron no acelerador, sendo acelerado, ganhando massa e ficando mais pesado*' [51:17].

• Comentários:

Durante as explanações do professor, apareceram ocorrências nas componentes *Matemática*, *Ordenamento* e *Re-significação*. No trecho inicial da tarefa, quando estava previsto o cálculo do produto escalar do quadrimomento, o professor não o apresentou na lousa, mas sim, usou o seu slide. Com isto, consideramos que a componente *Matemática* foi prejudicada.

A componente *Ordenamento* apareceu em duas situações durante esta tarefa. No slide em que o professor apresentou o cálculo de p^2 , a dedução já estava inteiramente feita. Esta informação visual precoce da massa invariante quebrou o efeito surpresa que estava

planejado no curso. Além desta situação, estava previsto no *manual de instruções*, ao final desta tarefa, a atividade 6. O professor pula esta atividade e inicia uma discussão que consideramos a última tarefa.

Durante a execução da tarefa, observamos a componente *Re-significação*. Para situar o contexto delas, lembramos que o objetivo desta tarefa era re-significar a massa e a energia. As ações planejadas no curso para conseguir isso envolviam duas etapas. A primeira delas consistia em mostrar que a massa é um invariante relativístico, a partir do cálculo de p^2 . A segunda era expressar o trimomento de um corpo, como sendo proporcional ao produto de sua energia por sua velocidade. Esta segunda etapa não aparece na apresentação feita pelo professor. Com isso, a transferência da inércia da massa para a energia não foi feita explicitamente, dificultando a transmissão desse re-significado. Além disso, em algumas ocasiões, o professor não se posiciona claramente acerca de a inércia estar associada à massa, ao momento ou à energia.

* * *

Tarefa 5: Discussão epistemológica e ontológica sobre a massa e a energia, percorrendo e interpretando todos os resultados apresentados

Classificação: tipo fim

Intervalo previsto: [105min - 120min]

Intervalo do professor: [52min - 83min]

Componentes da I.D.: *Ordenamento e Re-significação*

Esta era a última tarefa do aula 6 e considerada um fechamento da parte teórica do curso. Estava prevista uma discussão, de natureza epistemológica, sobre os conceitos de massa e energia para se encerrar a aula num 'ponto alto', com o propósito de mostrar uma síntese da mudança epistemológica que a massa sofreu, ao longo de quatro séculos, e como os conceitos se reorganizaram na relatividade. Nas reuniões de *design* discutimos, aula a aula, com os esquemas conceituais de cada cenário. Estes esquemas nortearam o curso inteiro e deveriam ter sido transmitidos, não diretamente, mas através dos caminhos percorridos neles.

O professor cumpre a última tarefa no intervalo [52:02 - 1:23:29]. Inicialmente, ele apresenta um slide com um resumo de questões importantes a serem discutidas, como fechamento da aula. Ele volta à discussão já feita nas tarefas anteriores, e se guia, lendo os itens do slide, mostrado na figura 4.5.10. O professor lê o item 1 e afirma que o termo 'energia de repouso' é mais adequado que 'massa de repouso'.

Figura 4.5.10: Slide resumo aula 6 - [51:59]

Ao ler o item 2 do seu slide, volta a comentar sobre a expressão $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ e enfatiza que o problema consiste em interpretá-la, dizendo:

[52:48 - 53:10] Quando eu escrevo isso (se refere à expressão), a gente não deve interpretar que um corpo ganhou massa. A gente deve interpretar que, ao ganhar energia, classicamente isso se manifesta com... (quer dizer a massa). É só uma maneira de interpretar classicamente o que está acontecendo na teoria da relatividade. Não é que o corpo ficou mais pesado.

[53:20 - 53:54] Esta expressão precisa ser analisada com cuidado, do ponto de vista epistemológico, porque ela induz a um erro... eu nem acho que os autores de livros cometem este erro, pelo contrário, tenho certeza absoluta que os autores de livro tem pleno conhecimento disso que a gente está falando. Só que de alguma forma, isso traduz um pouco essa passagem que a gente tem da massa clássica para a teoria da relatividade e que, de fato, está fora do nosso escopo de entendimento.

Por último, ele se refere à pergunta 3 do seu slide: *'a inércia pertence à massa ou a energia? Será que a inércia é um atributo da massa (ou da energia) ou é a inércia que se manifesta (classicamente na massa, relativisticamente na energia)?* Daí, o professor parte para a discussão da inércia. Ele junta as expressões do momento e da energia, escrevendo na lousa e discursando que como $p = mv$ e $E = mc^2$, podemos escrever a massa como $m = \frac{E}{c^2}$ e substituir este resultado em p , produzindo $p = \frac{E}{c^2} v$. Mostramos na figura 4.5.11 seu raciocínio escrito na lousa. Ele complementa se referindo aos atributos da massa clássica: *'na teoria da relatividade talvez a energia que passa a ser dona dos atributos agora'* [54:36].

Figura 4.5.11: Inércia da energia - [54:36]

Em seguida a este slide, o professor apresenta as lentes gravitacionais, como evidência da relatividade geral. Ele explica sua nova figura, que mostramos em 4.5.12, dizendo que a *'luz sofre uma curvatura e que sugere que talvez ela esteja sofrendo uma influência do campo gravitacional'* [55:52]. Ele coloca as lentes gravitacionais como uma outra evidência que *'parece que é a energia e não a massa que carrega estes atributos fundamentais'* [56:31].

Figura 4.5.12: Lentes gravitacionais - [56:56]

Após explicar as lentes, o professor diminui o ritmo, perguntando à sala se está tudo bem. Uma aluna diz que 'não' e indaga:

[57:20 - 57:32] E aí, tem um outro grande problema porque nós temos a necessidade de definir as coisas e tudo agora está relacionado com a energia, que a gente também não sabe o que que é.

O professor responde, falando sobre o problema filosófico da definição e da linguagem. Após dois minutos, pergunta de novo se estava tudo bem e outro aluno volta à questão da conversão massa-energia, perguntando, de maneira confusa, como se dá essa conversão. O professor responde:

[59:11 - 59:51] Quando você fala que uma coisa se converte em outra, você está dizendo que uma coisa deixou de ser uma coisa e passou a ser outra. Aqui, veja, não tem essa conversão de massa-energia, energia-massa. Não tem conversão. Existe manifestação. Ela se manifesta classicamente de uma jeito ou de outro. Mas não tem... é sutil isso. É isso que está embutido naquela expressão. Não é que eu dei energia e a energia se transformou... energia virar massa... são coisas contrár... a gente tem uma palavra em filosofia 'de ontologia'. Ontologia tem a ver com a existência das coisas. Ontologicamente são coisas distintas, massa é uma coisa, energia é outra.

A partir dessa resposta, inicia-se uma longa discussão coletiva, na qual praticamente a sala inteira se envolveu, centrada na conversão massa-energia e no significado da massa ser um invariante relativístico.

Após um certo tempo, o professor encerra a discussão, entregando a atividade 6, um exercício simples, para os alunos. Ele distribui esta atividade no instante [1:04:13] e, após 7 minutos, o professor senta na mesa, próximo aos alunos. Nesse momento, inicia-se uma nova conversa coletiva sobre conversão de massa em energia. Este diálogo ocorre no trecho [1:11:00 - 1:17:44], durando quase 8 minutos. O professor coloca, em seguida, o problema no âmbito da epistemologia, dizendo:

[1:21:31 - 1:21:45] Como a gente só trabalha com teoria, teoria, teoria, eu só sei olhar para esta expressão (se refere à massa) do ponto de vista teórico. E do ponto de vista teórico, o que ela está dizendo? Ela está dizendo que a massa varia! Essa expressão precisa ser entendida do ponto de vista epistemológico. Mas aí, você precisa ter uma vivência epistemológica para entender, senão você não consegue interpretá-la de outra forma.

Em seguida a estes comentários, o professor encerra a aula.

• Comentários:

Durante a execução desta última tarefa, houve ocorrências em duas componentes: *Ordenamento* e *Re-significação*. Em relação ao *Ordenamento* das ideias, estava previsto no *manual de instruções*, que os alunos fizessem a atividade 6 no final da tarefa 4 e o professor introduziu esta atividade no final da aula, após a discussão de fechamento prevista. Em

outro momento da aula, o professor introduz um conteúdo não previsto, ao mencionar as lentes gravitacionais no meio da discussão sobre a massa.

Sobre a componente *Re-significação*, as discussões com os alunos parecem sugerir que a re-significação do papel da massa não foi completa. Em particular, no que diz respeito à massa ser um invariante relativístico e ela poder se transformar em energia em reações.

Resultados da Aula 6

Mostramos, no início da descrição da aula 6, o quadro geral 4.5.1 com as componentes que observamos. Detectamos quatro das componentes nesta aula: *Ordenamento*, *Matemática*, *Significação* e *Re-significação*. Na figura 4.5.13, apresentamos o desempenho do professor implementador com o quadro que sintetiza o resultado da análise.

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	T2, T3, T4 e T5	4
<i>MAT</i>	T2 e T4	2
<i>SIG</i>	T1 e T2	2
<i>EPI</i>	-	-
<i>RE-SIG</i>	T3, T4 e T5	3

Figura 4.5.13: Desempenho do prof. na aula 6

Aspectos relacionados à componente *Ordenamento* apareceram durante as tarefas 2, 3, 4 e 5. Na componente *Matemática*, eles ocorreram nas tarefas 2 e 4, e a componente *Significação* apareceu duas vezes, durante a tarefa 1 e 2. Por fim, a componente *Re-significação* apareceu nas tarefas 3, 4 e 5.

* * *

Com a observação destas três aulas e a apresentação dos resultados, encerramos a etapa da análise. No próximo capítulo discutimos estes resultados articulando com as cinco componentes da ID, com as especificidades do conhecimento científico, com as habilidades requeridas para o ensino de física moderna e com aspectos mais amplos da transposição didática.

Capítulo 5

O Curso e a ID

5.1 A Mistura das Componentes da ID

No conjunto de sete aulas dadas pelo professor implementador, as três escolhidas para serem analisadas constituem uma amostra representativa. Nesta pesquisa *qualitativa*, consideramos uma aula de cada cenário: uma de mecânica, uma de eletromagnetismo e outra de relatividade e cada uma das ocorrências identificadas no capítulo anterior é uma evidência relevante para nossas questões de nossa pesquisa. Nossa análise foi baseada no quanto o professor se apropriou da ID. Para fins de análise, consideramos a ID como um feixe com cinco componentes e os seus comparecimentos não são uniformes em cada aula.

Quando definimos as cinco componentes da ID, imaginávamos que existiriam graus diferentes de dificuldade na manifestação de cada uma delas. Introduzimos as componentes na análise na ordem crescente de dificuldade, conforme nosso entendimento inicial. Porém, observamos durante a análise das três aulas que esta ordem, pelo critério de dificuldade de manifestação das componentes não existe. De fato, todas as componentes estão relacionadas entre si e se influenciam mutuamente.

* * *

A componente *Matemática*, conforme já mencionamos na seção 4.2, visa representar os conceitos e suas relações, através de estruturas matemáticas e interpretá-los fisicamente. No curso estavam previstas algumas deduções matemáticas, mostrando a origem de fórmulas, tais como $E = mc^2$, os teoremas do impulso e da energia cinética, com o intuito de evidenciar o pensamento físico-matemático e evitar abordagens dogmáticas. Elejemos esta

componente devido à sua importância em caracterizar o conhecimento físico e ela aparece na maioria das aulas, sendo essencial para garantir a identidade do curso.

A segunda componente importante é o *Ordenamento*. Ela tem a função de preservar a integridade da narrativa didática, mantendo a ordem e a sequência das ideias. Os elementos apresentados foram sequenciados num planejamento prévio, discutidos com o professor implementador nas reuniões de design e registrados no *manual de instruções*. Esta é a componente que aparece em todas as aulas do curso, pois o *Ordenamento* dos tópicos não está relacionado a conteúdos específicos, mas sim, à linearização da estrutura do curso. Comparando esta estrutura a um esqueleto, a coluna vertebral corresponde ao eixo central do curso, sustentado pelos elementos **tipo fim**. Os elementos **tipo meio**, com outra funcionalidade, estão ligados lateralmente aos **tipo fim** e foram escolhidos para compor o esqueleto. Essa analogia está representada na figura 5.1.1, onde as caixas vermelhas localizadas na coluna central são os elementos **tipo fim** e, as azuis, são os conteúdos **tipo meio**.

Figura 5.1.1: Estrutura espacial do curso

Esta figura deixa claro que o conhecimento ocupa diferentes dimensões de uma região extensa, o que lhe dá um caráter *tipo-espaço*. Um curso, por outro lado, só pode ser dado com um discurso que corre no tempo e, portanto, ele oferece um conhecimento sequencial, em que um elemento é apresentado após outro. Por isso, ele pode ser classificado como um conhecimento *tipo-tempo* (KNEUBIL e ROBILOTTA¹, 2014). O caráter temporal do

¹*Physics Teaching: Mathematics as an Epistemological Tool*. Artigo aceito para publicação na revista Science & Education.

curso obriga que elementos **tipo meio** e **tipo fim** sejam ordenados sobre um único eixo, como mostra a figura 5.1.2.

Figura 5.1.2: Estrutura temporal do curso

Este entendimento do curso mostra o significado da componente da ID *Ordenamento*. Como o curso tem um caráter teleológico, a apreensão desta componente requer um entendimento global e o domínio do porquê cada elemento foi colocado nele.

A componente *Ordenamento* envolve um constante diálogo entre o **global** e o **local**, entre a **parte** e o **todo**. Se um conteúdo local for apresentado sem clareza da estrutura global do curso, pode ocorrer uma alteração involuntária na sequência dos tópicos, enfraquecendo a narrativa didática. Na figura 5.1.2, omitir um tópico seria equivalente a pular alguma das caixas azuis, deixando um buraco no caminho orientado pela flecha horizontal. Alterar algum conteúdo, corresponderia a trocar uma caixa por outra, o que também pode descaracterizar a estrutura didática do curso.

* * *

A nossa terceira componente da ID é a *Significação*. Preocupamo-nos em atribuir significado a alguns conceitos, que consideramos chave neste curso. Significar um conceito é dar sentido a ele. O seu significado não está nele mesmo, mas sim na relação dele com outros, ao seu redor. Significados são dados pela inserção de ideias em estruturas vizinhas. Por exemplo, para dar significado à *carga elétrica*, é necessário relacioná-la a algumas entidades, tais como campo elétrico ($\vec{E}$), energia potencial eletrostática (U), potencial elétrico (V) e força elétrica ($\vec{F}$), mostrada na figura 5.1.3. Esta pequena estrutura sustenta o significado da carga.

Figura 5.1.3: Estrutura da carga elétrica (SALEM, 1986)

O discurso das aulas foi planejado baseado nos nossos esquemas conceituais. De um modo geral, *'mapas conceituais consistem em rótulos conceituais que identificam ideias (conceitos) e a relação entre eles, que explica como os conceitos são relacionados para dar significado'* (HAY et al., 2008, p.302). Os vários conceitos estão representados pelas caixas da figura 5.1.1 e os seus significados são dados pelas relações com os elementos vizinhos. Por exemplo, na aula 4, uma das primeiras tarefas era significar as linhas de campo. Para isso, o professor deveria percorrer alguns elementos circundantes, tais como simetria esférica, vetores, campo coulombiano, carga em repouso/movimento, direção radial, etc. Ao discorrer sobre estes elementos, ao redor do conceito, espera-se que o seu significado mais profundo e não-verbal seja transmitido. O significado não está na caixa, mas percorrer as vizinhanças permite entender a ontologia da caixa!

* * *

A componente *Significação* corresponde a mergulhar dentro de uma caixa. Esta componente está relacionada à *Ordenamento*, pois existe um diálogo entre a caixa e a linha. Na figura 5.1.2, a componente *Ordenamento* é responsável pela escolha das caixas e pela ligação entre elas. Esta ideia está apresentada na figura 5.1.4.

Figura 5.1.4: Relação entre as componentes SIG e ORD

A componente *Significação* corresponde a entrar dentro do conceito-caixa e a componente *Ordenamento*, à ligação-linha entre as caixas. Assim, no curso, ordenar é um ato de significar. As duas componentes são complementares, assim como as dimensões *extensão* e *profundidade* do conhecimento.

Figura 5.1.5: Complementaridade entre as componentes

A complementaridade entre essas componentes e a relação delas com as dimensões *profundidade* e *extensão*, é análoga ao exemplo, dado na seção 4.2, do cachorro e da orelha. Significar uma peça pertencente ao cachorro, é, por exemplo, entender o que é uma 'orelha'. Ordenar as peças é montar o conjunto, dando um sentido global, que é o cachorro. O cachorro é o todo, dado pela extensão-ordenamento. A orelha é a parte, dada pela profundidade-significação.

* * *

A quarta componente da ID é a *Epistemologia*. Esta era uma intenção explícita do curso e permeava todo o conteúdo, dando um tempero às discussões. Esta componente visava trazer uma concepção do que é a ciência e está relacionada, essencialmente, ao 'fazer-física'. Quando ela aparecia, esta componente permitia proporcionar instantes em que se mostrava aspectos gerais e grandes da física, como corpo de conhecimento. Epistemologia é uma área da filosofia que discute a teoria do conhecimento. Na física, a epistemologia está relacionada à construção e à organização do conhecimento científico. O enfoque que damos à *Epistemologia* neste curso tem, principalmente, relação com um conteúdo. Para nós, esta *Epistemologia* é um instrumento que permite um panorama amplo ser visto, através de conteúdos específicos. É possível partir de um caso particular e sentir a totalidade da física. É como se no particular estivesse o universal e, como se, em um exemplo estivessem todos os outros.

Preocupamo-nos em fazer discussões epistemológicas em vários momentos do curso. Nossa ideia é que, partindo de exemplos concretos da física, é possível fazer uma ligação

com a sua estrutura inteira e ter a percepção da dimensão deste corpo de conhecimento. A *Epistemologia* no ensino incorpora uma *atitude de reflexão* sobre casos concretos, abrindo um canal de ligação com o conhecimento físico no seu sentido mais amplo. Essa atitude permite olhar, refletir e entender algo maior do que aquilo que você olhou inicialmente.

Nosso entendimento é que *Epistemologia* não existe sozinha. Ela não é uma entidade abstrata, pois só é possível refletir sobre exemplos concretos. É preciso vestir *Epistemologia* nos casos particulares, pois a '*epistemologia, na ausência de contato com a ciência, torna-se vazia*' (EINSTEIN apud PATY, 1995, p.39).

Karam (2012), em seu doutorado, analisou as aulas de um professor do Instituto de Física da USP, que expressa a importância de introduzir 'epistemologia vestida na física', em suas aulas. Este professor ainda defende que é impossível discursar sobre o 'fazer-física' sem olhar para a própria física. Transcrevemos uma de suas falas, numa aula de Física III, que exemplifica como ele acha que deve ser a atitude de unir Epistemologia com Ciência.

O que é uma teoria física? Não sei. Ninguém poderá discursar adequadamente sobre o que é uma teoria física, da mesma forma que ninguém poderá discursar adequadamente sobre o que é um ser vivo. A gente consegue falar verdades parciais a respeito de um ser vivo. Mas você não consegue esgotar esse conceito com palavras. Como que a gente sabe o que é um ser vivo? Interagindo com eles. Daí a gente ganha conhecimento que está localizado em uma outra esfera da nossa inteligência, que é uma esfera não verbal. Você não pode falar, você sabe, mas não pode falar. Teoria é mais ou menos isso. Se você quiser falar alguma coisa da teoria, qual é a atitude mais prudente? Vai lá e olha o eletromagnetismo. E o que você conseguir falar sobre o eletromagnetismo é bom porque o eletromagnetismo é uma teoria. (prof. analisado, 2008 apud KARAM, 2012, p.114).

A introdução de *Epistemologia* nas aulas permite um distanciamento do objeto exemplo e eleva o seu entendimento. É como olhar uma floresta de cima de uma montanha. Nesta posição é possível ver aspectos gerais da floresta, que não seriam visíveis se estivéssemos dentro dela, ao lado de uma árvore. Inserir *Epistemologia* num curso é uma estratégia que permite ver a *extensão* do conhecimento. No nosso caso, planejamos introduzir *Epistemologia* em situações específicas, que funcionassem como uma porta de saída do micro para o macro. Por exemplo, na aula 4, introduzimos intencionalmente a situação da desaceleração da carga para discutir a **quebra da terceira lei** de Newton. Esse caso particular permitiu uma discussão do papel universal de uma lei na física. Na aula 2, apresentamos o átomo de hidrogênio e, ao final, introduzimos intencionalmente a discussão sobre o uso de modelos na física. O cálculo do raio do átomo é um exemplo de como a ciência chega a grandezas

microscópicas que não podem ser medidas. O caso particular do átomo nos leva a entender como a física funciona, na relação entre teoria e fenomenologia. Esta é uma faceta da *Epistemologia* mais localizada e direcionada a conteúdos específicos.

Uma outra faceta dela, que consideramos importante neste curso, tem caráter mais geral e abstrato, pois está associada a um modo de pensar e organizar as ideias. Ela foi usada durante a concepção e gestação do curso e esteve presente conduzindo o pensamento durante o *design*. Por exemplo, a inserção de uma aula inteira sobre a origem da radiação, para depois quebrar a 3ª lei de Newton, foi uma opção fundamentada em uma consciência epistemológica. Fez parte da decisão de inserir esta aula no curso, a consciência de que o seu conteúdo daria uma base sobre o papel de uma teoria em física e o que significaria uma ruptura teórica. Esta base aplainaria o terreno para os conceitos da teoria da relatividade que viriam posteriormente. Mesmo não sendo necessário passar pela quebra da lei de Newton para ensinar relatividade, esta discussão propicia a reflexão do fazer-física.

* * *

A última componente da ID que levantamos como fundamental no curso é a *Re-significação*. Re-significar é atribuir um novo significado a um conceito que já possuía um. Na nossa TLS, temos a intenção de re-significar vários conceitos, tais como inércia, energia, quantidade de movimento, o peso de um corpo, etc. Dentre eles, o principal é a **massa**. A massa é uma das entidades mais conhecidas da mecânica clássica. Nas duas primeiras aulas do curso, estabelecemos as ligações da massa com os outros conceitos da mecânica, como força, inércia, momento, energia, gravidade, etc. Nossa intenção foi reforçar o significado da massa dentro do esquema conceitual da mecânica, que mostramos na seção 1.3. Após esta etapa, o curso promove uma re-significação, no contexto da relatividade restrita. Significar é entender uma caixa, re-significar é mudá-la de posição, estabelecendo outras relações. Por exemplo, ao olhar a figura 5.1.6(a), temos um entendimento do que significa o segundo símbolo: é um 'B'. Entretanto, o mesmo elemento, quando colocado em outro contexto, como na figura (b), adquire outro significado. Este exemplo mostra uma re-significação, entretanto, não é necessário fazer um discurso explicativo sobre **como** essa re-significação aconteceu.

Figura 5.1.6: Mudança de significado

No ensino da relatividade, os livros-texto apresentam a re-significação da massa. Mas, em geral, eles não fornecem elementos que permitam perceber claramente as ligações entre os conceitos dentro da relatividade e efetuar a comparação com a estrutura da mecânica, de forma a facilitar ao estudante entender qual foi a modificação ocorrida. Nesta situação, a *Epistemologia* não é considerada necessária para o entendimento da física, pois não compromete o seu aprendizado. Os alunos, ao final desse tipo de abordagem, podem adquirir a informação que a massa é um invariante na relatividade. Entretanto, o fato deles terem esta informação não significa que a massa foi re-significada plenamente, pois eles poderão não ter o arcabouço epistemológico que está por trás desta afirmação.

A *Re-significação* com *Epistemologia*, por outro lado, permite entender **porquês, como e implicações**. Mais do que ser um conhecimento, a *Epistemologia* redefini a relação do indivíduo com o próprio conhecimento. Ela permite que o aluno entenda como ele entender. O aluno se vê entendendo. Ele se inclui no ato de conhecer. Sem *Epistemologia*, o sujeito que entende é separado da física. Porém, com *Epistemologia*, o 'ato mágico' de entender promove uma fusão entre o sujeito e o conhecimento. O aluno pode ver a extensão do conhecimento de cima e a sua consciência se amplia.

No nosso curso, pensamos na *Re-significação* da massa com *Epistemologia*, pois ela decorre de uma mudança de posição da estrutura da mecânica para a da relatividade. Este entendimento existiu, durante todo o planejamento do curso, especialmente, no percurso pelos esquemas conceituais, apresentados na seção 3.3. Por isso, o nosso curso propiciou aos estudantes o entendimento do **porque** a massa mudou, do **como** a massa mudou, de **quais as implicações** da massa ter mudado e de **quais as diferenças** da massa da mecânica e da relatividade.

* * *

A discussão anterior indica que as cinco componentes da nossa *intenção didática* estão

relacionadas entre si. *Significação* e *Epistemologia* relacionam-se com a *extensão* do conhecimento. *Re-significação* e *Epistemologia* relacionam-se com a *extensão da extensão* do conhecimento. A escolha e o *Ordenamento* dos conteúdos são essenciais para promover o efeito da *Re-significação* da massa. A *Matemática* usada no curso é uma ferramenta de *Epistemologia*, na medida que ela transcende sua operacionalidade local e permite relacionar situações similares nos diversos contextos da física. Por exemplo, incluímos no curso a discussão e o cálculo detalhado do produto escalar na relatividade por rotações, para depois relacioná-lo com o efetuado no espaço quadridimensional. Esse tipo de mistura ocorre porque as cinco componentes da ID são inerentes à natureza do conhecimento científico e não apenas à abordagem didática.

5.2 Conhecimento Didático

Um dos objetivos de desenvolver e implementar sequências didáticas é extrair resultados e conhecimento pertencente a uma dimensão didática, como discutido na seção 2.1. Este tipo de conhecimento depende do conteúdo específico de física que, no nosso caso, envolveu física moderna. No Brasil, é natural que a física moderna seja alvo da maior parte das pesquisas, dada a dificuldade para ela entrar no currículo do ensino médio. Consequentemente, não há prática de ensino com esses temas e o conhecimento didático acerca deles é ainda escasso.

A implementação da nossa sequência didática nos permitiu detectar alguns aspectos relativos ao ato de ensinar conteúdos de física moderna, especialmente a relatividade. Estes aspectos, por terem uma dimensão prática, estão relacionados ao *progresso didático*, mencionado por Lijnse e Klaassen (2004).

Nossa pesquisa envolveu basicamente dois elementos: o conteúdo de física e a ação do professor implementador. Do primeiro resultou a elaboração de uma proposta de curso, acerca da massa, que corresponde a um **novo saber escolar**. Do segundo, a observação de dificuldades de transpor este saber para a sala de aula. Por isso, o *conhecimento didático* levantado com nossa pesquisa tem relação tanto com o conteúdo, quanto com as habilidades docente-didáticas do professor. Durante a execução do nosso trabalho, reconhecemos cinco competências diretamente associadas ao conteúdo particular do nosso curso. Elas estão descritas a seguir.

- **Reconhecer a funcionalidade de pré-requisitos**

Saber escolher os elementos apropriados para ensinar determinados tópicos é essencial e útil para otimizar, aperfeiçoar, motivar e conferir economia ao processo de ensino dentro da sala de aula. No nosso curso, por exemplo, inserimos, em uma aula, o cálculo da módulo da diagonal de um cubo num espaço tridimensional. Isto foi feito **apenas porque** sabíamos que, duas aulas depois, iríamos falar da quadri-distância na relatividade. Escolher os pré-requisitos de uma maneira justa, necessária e econômica não é uma habilidade simples. Esta competência está relacionada à nossa componente *Ordenamento*. Nossa formação não abrange este tipo de habilidade, pois nossa vivência escolar, desde a fase de aluno, é baseada numa tradição de listas de conteúdos dispostos em grades curriculares. Por isso, esta habilidade não é natural e precisa ser treinada para poder ser praticada no ensino de física, especialmente no que envolve sequências temáticas.

- **Saber re-significar conceitos físicos**

Em física moderna os conceitos mudam de significado e, por isso, saber re-significá-los é uma habilidade necessária para poder transitar de uma teoria para outra. A re-significação de um conceito na física está associada a reestruturações, já que o significado de um conceito depende do contexto no qual ele se insere. Foi possível verificar a importância de saber re-significar conceitos na implementação da nossa sequência didática. O exercício desta habilidade requer uma visão mais ampla da física e um conhecimento de outros cenários além daquele que o professor está ensinando.

- **Saber interpretar as equações**

As ideias da física, muitas vezes, estão representadas por meio de expressões matemáticas. Extrair estas ideias das equações e interpretá-las é uma habilidade bastante complexa requerida do professor, e que necessita experiência no ensino daquele conteúdo. No caso da relatividade, as equações são impregnadas pela noção de mudança de referencial e, por isso, são mais difíceis de serem interpretadas que as da mecânica clássica.

- **Saber abstrair os conceitos**

A *abstração* seja uma característica do conhecimento físico e, por isso, a capacidade de abstrair é uma competência necessária para o professor. Na física clássica, os conceitos como tempo, força, campo, velocidade, energia, etc, já são abstratos. Na relatividade, eles são incorporados em estruturas maiores, o que os torna ainda mais abstrato. Por

exemplo, o espaço passa a ser pensado como uma entidade quadridimensional e lidamos com 'vetores' com quatro coordenadas. Entender o significado do módulo de um quadrivetor na relatividade, requer uma abstração bastante complexa, já que este módulo mistura o espaço com o tempo. O nosso curso incorpora vários destes conceitos abstratos, tais como tempo próprio, intervalo relativístico e massa relativística. Isto nos permitiu constatar que a transmissão dos seus significados está relacionada à capacidade de abstrair, mais do que os da física clássica.

• Saber transformar questões

Esta habilidade está relacionada à uma percepção das especificidades dos problemas que cada teoria trata. Ela é muito importante nos conteúdos de física moderna e, em geral, solicitada quando um aluno faz um questionamento. Um professor inexperiente, se for levado pela questão, do jeito que o aluno a formulou, tem grande chance de escorregar. Isto acontece porque os problemas que cada teoria dá conta de resolver são diferentes. A maneira como se pensa e como se trata as situações físicas, na relatividade, são particulares. A concepção que se tem da relatividade conduz a formas de discutir questões apenas de relatividade. Se um aluno coloca um problema baseado num pensamento clássico, o professor precisa ter a perspicácia de perceber isso e reformular a questão dele, trazendo-a para o contexto da relatividade. Esta ação é totalmente positiva, pois ensina que pensar em relatividade também é colocar as coisas no âmbito da teoria. Esta habilidade requer experiência e prática de ensino do tema de física moderna.

* * *

Estas cinco habilidades estão diretamente ligadas ao ensino da física moderna. A prática de ensinar física clássica pode não desenvolver no professor estas competências. Elas são ligadas à capacidade de agir em consonância com o conteúdo e, principalmente, são requeridas pela natureza do próprio conteúdo. A capacidade que um professor tem de tratar um conteúdo influencia, definitivamente, a sua aula, dando a ela mais ou menos *qualidade didática*.

5.3 A ID na Sala de Aula

A análise do desempenho do professor implementador nas três aulas mais representativas do curso foi feita no capítulo 5 e condensada nas tabelas 4.3.6, 4.4.11 e 4.5.13,

reproduzidas abaixo. Como descrito no capítulo 4, a palavra ocorrência refere-se a um desvio da ação planejada na TLS. Os seus resultados sugerem algumas relações entre o índice de ocorrência das componentes e o conteúdo de física envolvido.

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	T1, T2 e T3	3
<i>MAT</i>	-	-
<i>SIG</i>	T2, T4 e T5	3
<i>EPI</i>	-	-
<i>RE-SIG</i>	-	-

Aula 4 - Radiação e Ação-Reação

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	T3 e T5	2
<i>MAT</i>	-	-
<i>SIG</i>	T1, T2 e T3	3
<i>EPI</i>	T4 e T5	2
<i>RE-SIG</i>	T4 e T5	2

Aula 6 - Relatividade: Massa e Energia

componentes da I.D.	Tarefas	Índice de Ocorrência
<i>ORD</i>	T2, T3, T4 e T5	4
<i>MAT</i>	T2 e T4	2
<i>SIG</i>	T1 e T2	2
<i>EPI</i>	-	-
<i>RE-SIG</i>	T3, T4 e T5	2

Figura 5.3.1: Desempenho do prof. nas três aulas analisadas

No que diz respeito à componente *Matemática*, não houve nenhuma ocorrência nas aulas 1 e 4. Este resultado é interessante, pois independentemente do conteúdo, a matemática ser uma ferramenta da física é uma ideia hegemônica, tanto para os cientistas, quanto para os professores. Por isso, em qualquer aula de física, seja na educação básica, seja no ensino superior, sempre haverá aspectos matemáticos envolvidos. Ao conduzir uma aula

de física, o professor sempre fará alguma referência à 'competência' matemática, mesmo que inconscientemente, por exemplo, na dedução de uma simples fórmula, na resolução de uma equação ou, até mesmo, num raciocínio lógico usando regra de três. Sendo assim, a matemática se constitui como um *núcleo duro* da física, que não pode ser descartado. Ela é uma espécie de padrão. Se observarmos vários professores diferentes dando uma aula de *campo elétrico*, a sequência de ideias apresentadas por eles poderá ser diferente, alguns exemplos ou analogias, também. Entretanto, todos eles apresentarão a estrutura matemática do campo $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$. É quase como se a dedução de fórmulas e a resolução das equações em exemplos ou exercícios constituíssem a tarefa mínima que um professor de física deve executar em uma aula. Deduzir fórmulas requer técnicas advindas de dentro da própria matemática. Fazer isto está dentro de um domínio instrumental de regras, cujo processo pode ser caracterizado **sem** grande referência à física (UHDEN et al., 2012).

Imagino que, se um professor tivesse que dar uma aula de um conteúdo que nunca tenha ensinado, a preparação dela estaria focada, principalmente, na dedução da fórmulas que expressam a relação entre as grandezas relevantes daquele conteúdo. Certa vez, eu tive que dar uma aula de um tema de física moderna para alunos do ensino médio que estavam participando da Olimpíada Brasileira de Física. O tema era *efeito fotoelétrico* e, diante da experiência inédita de lecionar este tema, me lembro de ter pensado durante a preparação da aula '*quais são as coisas mínimas e essenciais que devo colocar neste aula?*'. E claro, a resposta não era difícil. Minha primeira aula de efeito fotoelétrico foi baseada em discutir o que era o efeito, quais as grandezas físicas envolvidas e, principalmente, qual a **equação** que descreve o efeito fotoelétrico. Após apresentar a equação $E = h\nu - \Phi$, imediatamente construí o gráfico e a discussão passou a girar em torno de interpretar fisicamente os parâmetros e características do gráfico, como a frequência de corte, a função trabalho, etc... Claramente, eu deixei de lado abordagens, tais como enfoque histórico, interpretações aprofundadas, comentários epistemológicos, etc, que requerem maior estudo e experiência, para uma outra oportunidade.

Os resultados indicam que, nas aulas de mecânica e eletromagnetismo, o professor implementador demonstrou habilidade nos momentos em que teve que apresentar as fórmulas relevantes. No entanto, na aula de relatividade, onde estavam previstas duas deduções, a da energia relativística e a do produto escalar do quadrimomento, ele as narrou, a partir do seu slide projetado.

* * *

Em relação à segunda componente *Ordenamento*, imaginávamos inicialmente que ela seria independente das demais. Entretanto, a medida que nosso próprio entendimento sobre o curso se ampliou, essa ideia se alterou, conforme mencionamos na seção anterior. Na nossa análise, observamos divergências nesta componente nas três aulas. Na aula de mecânica, elas ocorreram devido à inserção de conteúdos não previstos no curso, conforme já descrevemos, durante a execução das tarefas 1 e 2. Em outros momentos houve a inversão de algum elemento, como a ocorrida na aula 4, onde o professor apresentou o simulador antes de significar o surgimento das ondas eletromagnéticas. Na aula de relatividade, elas apareceram em maior número e, principalmente, em tarefas tipo fim.

As ocorrências de *Ordenamento* não podem ser atribuídas à falta de preparo das aulas por parte do professor, pois pudemos verificar que ele se preparou muito bem e se guiava pelas suas próprias anotações manuscritas. Isso nos leva a supor que elas tenham ocorrido devido a imprevistos e aspectos inéditos que se apresentaram durante a aula. Estes imprevistos fazem parte da realidade e do cotidiano da vida de um professor. Circunstâncias e discussões inusitadas sempre podem aparecer em aulas de física e, especialmente neste curso que tem grande parte do conteúdo inédito, elas ocorreram em muitos momentos. Quando um aluno interrompe com algum questionamento, mesmo sendo sobre o tema da aula, o professor, ao terminar a sua resposta, pode esquecer ou se desviar do roteiro previsto. Foi exatamente isso que observamos neste caso, pois os desvios estavam associados a perguntas vindas da sala. O fato de as ocorrências na componente *Ordenamento* terem sido em maior número na aula 6, pode indicar que em um conteúdo inovador, como a dinâmica relativística, a manutenção do *Ordenamento* dos elementos é mais difícil de ser conseguida.

* * *

Na componente *Significação*, observamos ocorrências nas três aulas analisadas, de maneira equilibrada. Elas aconteceram 3 vezes na aula de mecânica, 3 na de eletromagnetismo e 2 na de relatividade, perfazendo um número total de 9. Este resultado é similar ao da componente *Ordenamento*, o que sugere que estas duas componentes estejam correlacionadas, como discutido na seção 6.1.

Na aula de mecânica, o professor deixou de discutir a atividade relativa ao choque entre duas bolinhas, que havia sido planejada para dar significado à relação entre força e inércia

(tarefa 4 - aula 1). Além disso, deixou, também, de fazer o fechamento da aula previsto para enfatizar a inércia e a atratibilidade da massa. Na aula de eletromagnetismo, a componente *Significação* apareceu associada ao campo elétrico, tanto no caso de cargas estáticas, quanto de aceleradas. O simulador gráfico de linhas de campo de cargas em movimento estava previsto para ser apresentado após a discussão da origem da radiação ser feita na lousa, para enfatizar o significado das deformações das linhas de campo. Entretanto, essa ordem foi invertida.

No caso da aula de relatividade, a componente *Significação* apareceu no início da aula, com a omissão da discussão do problema clássico do ímã e da espira, previsto no manual. Houve, também, ocorrências relacionadas à introdução e interpretação do quadrimomento.

A aparição destes aspectos nas três aulas indica que esta componente não está relacionada a um conteúdo específico. Na maioria das vezes, as componentes *Significação* e *Ordenamento* apareceram juntas. Notamos que as interrupções dos alunos foram estímulos que afastaram o professor do eixo da aula e causaram ocorrência de *Ordenamento*. Este tipo de situação é muito comum em experiências de ensinar um conteúdo pela primeira vez. Colhemos relatos do professor implementador ao final de cada aula e, em relação a estas situações, e ele próprio diz:

"Quanto à pessoa X (escreve seu nome), senti-me, em alguns momentos, ansioso por ser a primeira vez que fazia tais discussões e isso pode ter transparecido de alguma forma" (relato feito após a aula 1, anexado no apêndice C).

"O que foi mais complicado nessa aula foi, sem dúvida, a apreensão e o nervosismo da 1ª aula. O fato de ser um curso no IFUSP teve seu peso também." (relato geral da TLS - aula 1, anexado no apêndice C).

Quando o professor era solicitado para discursar ou responder alguma dúvida de um aluno sobre algum conceito, foi possível perceber que, nas ocasiões críticas, seu discurso se perdia e parecia que algumas 'linhas ficavam com as pontas soltas'...e retornava ao eixo do curso num contexto diferente. Entender a **extensão** do conhecimento requer uma espécie de maturidade na prática do jogo entre *extensão* e *profundidade*.

* * *

Neste curso, a componente *Epistemologia* é considerada desejável, mas não obrigatória. A sua ausência não compromete o curso e o seu papel é análogo a uma espécie de tempero para as discussões. As tabelas mostram que não houve ocorrências nas aulas 1 e 6.

Apenas na aula 4, a de eletromagnetismo, observamos algumas falas inseguras do professor quando ele discutiu a quebra da 3ª lei de Newton e deixou de relacionar, com uma visão epistemológica, os conceitos de momento e inércia com o campo elétrico, conforme estava previsto no manual para a última tarefa desta aula.

* * *

Finalmente, a componente *Re-significação*. As tabelas mostram que o professor apresentou esta componente apenas nas aulas 4 e 6. Na primeira aula, a de mecânica, não existiam momentos em que esta componente estivesse prevista, pois os conceitos tratados nela são conhecidos e o objetivo era somente fortalecer os seus significados. Já nas aulas de eletromagnetismo e relatividade, a *intenção didática* explícita era a re-significação da inércia do campo, da 3ª lei de Newton, da fórmula $E = mc^2$ e do conceito de massa.

Na aula de eletromagnetismo, na discussão da 3ª lei de Newton, o professor trata com naturalidade o caso em que ela não se aplica, ao invés de considerá-lo como evidência de uma ruptura teórica importante. Novamente, motivado por questionamentos dos alunos, na aula 6 de relatividade, em alguns instantes o professor confunde os conceitos de massa invariante, por mudança de referencial, e conservação de massa em reações exotérmicas, sendo que a discussão desta última estava prevista para a aula seguinte.

Na mesma aula 6, o professor cita duas vezes o exemplo do elétron que ganha energia dentro do acelerador. Ele diz que devido à invariância da massa, o '*elétron não fica mais pesado*'. Por outro lado, no planejamento estava previsto para a aula seguinte, mostrar que o peso de um corpo está associado à energia.

As duas situações apontadas acima, da relação da massa invariante com o caso das reações exotérmicas e o peso dos corpos, sugerem que o professor não integrou o conhecimento de duas aulas sucessivas, tratando-as isoladamente, sem inserí-las no contexto do curso, com uma única ID. Estas ocorrências aconteceram justamente no desenrolar da ruptura entre as concepções clássica e relativística, apresentada na figura 1.4.1, que reproduzimos abaixo.

Pairou durante o *design* das aulas e do material escrito, uma intenção, de natureza epistemológica, de mostrar como as teorias são tratadas na física. O curso enfatiza nas aulas 6 e 7 a ruptura entre a mecânica e a relatividade e que as duas teorias não podem mais conviver juntas.

As passagens apresentadas abaixo, parecem sugerir uma briga interior do professor, entre as concepções newtoniana e relativística do mundo. Três falas extraídas da aula 6, transcritas abaixo, indicam uma coexistência das duas teorias na explicação de fenômenos, aparentemente associada a uma insegurança epistemológica.

[46:08 - 48:00] Porque a massa dele vai crescer a medida que se aproxima... Essa construção que a gente faz na nossa cabeça talvez precise ser reformulada. Porque a gente vive no mundo do clássico de novo, mundo de massas fixas, massas duras, massas definidas,... e talvez no mundo da energia... talvez a energia sofra a variação relativística e ela se manifesta classicamente com um jeito que a gente traduz na mecânica newtoniana... mas isso tem limitações quando você passa de um modelo para outro (se refere de uma teoria para outra) ... na verdade, é um problema mesmo! Eu estou tentando levantar conjecturas... eu não tenho respostas para isso.

[48:08 - 49:33] A questão é: essa inércia, nós vamos falar isso daqui a pouco... será que a inércia é um atributo da massa ou será que a inércia é um atributo da energia e que se manifesta na massa do mundo clássico?

[52:48 - 53:10] Quando eu escrevo isso (se refere à expressão $E = \gamma mc^2$), a gente não deve interpretar que um corpo ganhou massa. A gente deve interpretar que, ao ganhar energia, classicamente isso se manifesta com... (quer dizer a massa). É só uma maneira de interpretar classicamente o que está acontecendo na teoria da relatividade. Não é que o corpo ficou mais pesado.

5.4 O Professor e a Sala de Aula

A análise feita das aulas e os resultados discutidos na seção anterior são relacionados às componentes da *Intenção Didática* e a nossa pesquisa foi sobre a atuação do professor aplicador. A ideia da *Intenção Didática*, que deve fluir até a sala de aula, representada pela

3ª esfera do saber, abrange componentes de conteúdo, pedagógicas, estratégicas, didáticas, psicológicas e tudo que se refere a um saber amplo que aciona o professor para ensinar física. É importante ressaltar que a materialização do curso não se restringe apenas a sua *intenção didática*. O curso real é maior, porque envolve, também, elementos diferentes, relativos ao ambiente da sala de aula. Por isso, a resultante da ação do professor, dentro da sala, é dada pela interação de um conjunto de elementos particulares e únicos em cada contexto específico. Assim, a **aula** é o resultado do processamento desses fatores, pelo professor. Consequentemente, o *saber ensinado* dificilmente será igual ao *saber a ensinar*, já que o professor tem autonomia, liberdade e bom senso para adequar a ID à sua percepção da sala e de seus alunos.

Um aula real acontece com uma constante adequação e negociação do conteúdo com a reação da sala. Qualquer mudança de abordagem de um tema pode ser causada pela percepção do professor do ambiente externo. Em outras palavras, é como se o professor tivesse um termômetro que o guia durante a aula. Este termômetro funciona mediando o plano de aula e a *intenção didática* com a reação da sala frente às suas ações. Com isso, o refinamento da abordagem do conteúdo varia de turma para turma. Faz parte do papel do professor, exercer esta liberdade de *poder mudar*, conforme o seu julgamento. Este exercício é a essência da transposição didática interna, já que o professor não é simplesmente um 'reprodutor de conteúdos'.

Foi possível identificar, durante a implementação do curso inteiro, vários momentos em que o professor colocou sua personalidade nas abordagens. Imaginamos que estas pequenas mudanças no roteiro da aula podem ter sido motivadas pelo seu *termômetro*. Percebemos, através das filipetas, que os cerca de 15 alunos preencheram durante as aulas, que algumas destas mudanças surtiram efeito sobre eles. Este instrumento de avaliação, mencionado na seção 4.1, trouxe, também, indícios da receptividade dos alunos em relação a alguns tópicos, conforme descrevemos a seguir.

Na aula de Mecânica, o professor faz uma discussão longa sobre massa inercial e massa gravitacional que não estava prevista no manual. Consideramos que sua discussão acrescentou elementos importantes, de maneira construtiva. Alguns alunos se referiram a este momento nas filipetas, dizendo que ele trouxe **prazer intelectual**. Outra situação que constatamos, pela resposta dos alunos, foi em relação à discussão histórica e filosófica envolvendo Newton e Leibniz. Este momento foi apontado por alguns, como um dos que lhes chamou atenção e causou prazer. Por fim, o professor implementador, nesta aula, mostrou

as três formulações da 2ª lei de Newton. Verificamos que sua ênfase foi pessoal e criativa, já que no manual sequer havíamos imaginado a formulação de Euler. Seu discurso tornou a explicação mais completa e causou entre os alunos outro momento de prazer intelectual, que aferimos nas filipetas. No quadro 5.4.1, mostramos a transcrição das respostas dos alunos para a 1ª questão da filipeta: '*Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu prazer intelectual?*' As respostas originais estão anexadas no apêndice B e foram separadas em relação às três situações modificadas pelo professor: (i) discussão massa inercial x massa gravitacional, (ii) discussão histórica Newton x Leibniz e (iii) três formulações da 2ª lei de Newton.

		respostas dos alunos
discussão massa inercial x massa gravitacional	aluno 1	<i>A diferença entre massa inercial e gravitacional</i>
	aluno 2	<i>Quando começou a se falar da energia e da massa inercial e gravitacional</i>
discussão histórica: Newton x Leibniz	aluno 3	<i>Resgate do histórico debate filosófico sobre a natureza da força, massa, movimento, etc entre Newton e Leibniz</i>
	aluno 4	<i>Quando falando da 1ª e 2ª Lei de Newton</i>
	aluno 5	<i>Momento, leis de Newton, História dos Fundamentos</i>
três formulações da 2ª lei de Newton	aluno 1	<i>As 3 formas de enunciar a 2ª lei de Newton</i>
	aluno 6	<i>Dedução dos teoremas do impulso e da energia cinética</i>
	aluno 7	<i>Nas três formas da 2ª Lei de Newton</i>

Figura 5.4.1: Transcrição das respostas dos alunos - aula mecânica

Na aula de Eletromagnetismo, a quase a totalidade das respostas dos alunos aponta para a quebra da 3ª lei de Newton. A aula 4 que planejamos é considerada essencial nesta sequência didática e o seu principal objetivo era mostrar a limitação da mecânica newtoniana. Verificamos que este objetivo foi atingido e grande parte dos alunos se surpreendeu neste momento da aula. Detectamos, ainda, aspectos diferentes que chamaram a atenção dos alunos e lhes causaram prazer intelectual, em relação à: (i) quebra da 3ª lei de Newton, (ii) transferência de momento de uma onda eletromagnética e (iii) bolha de informação. Estes três temas fazem parte da essência da aula e podemos considerar como alvos atingidos. No quadro 5.4.2, mostramos a transcrição das respostas dos alunos da questão 1 da filipeta, relativa à aula 4 dada pelo professor implementador.

		respostas dos alunos
quebra da 3ª lei de Newton	aluno 1	<i>A quebra da 3ª lei de Newton</i>
	aluno 2	<i>A discussão da validade da 3ª lei de Newton e da...</i>
	aluno 3	<i>Verificar um caso em que a 3ª lei de Newton não vale</i>
	aluno 4	<i>Qdo falou das Leis de Newton Ação/reação</i>
	aluno 5	<i>Quando na atividade mostrou-se que a terceira lei de Newton possui uma certa incoerência</i>
	aluno 6	<i>Discussão sobre a "validade" da 3ª lei de Newton</i>
	aluno 7	<i>A quebra da 3ª lei de Newton pelo eletromagnetismo</i>
	aluno 8	<i>Na construção do raciocínio para atingir a conclusão da "quebra" da física clássica</i>
	aluno 9	<i>Triste em comprovar mais uma vez desde a graduação da limitação da Mec. Clássica</i>
transferência de momento de uma onda eletromagnética	aluno 2	<i>... conservação da quant. de movimento com a transferência da quant. de mov para as OEM</i>
bolha de informação	aluno 10	<i>Entendimento do que é como funciona a bolha de informação (êba!! Do curso de relatividade de julho, que eu fui fazer porque não entendi nada)</i>

Figura 5.4.2: Transcrição das respostas dos alunos - aula eletromagnetismo

A última aula que analisamos foi a 6, de relatividade. O objetivo principal dela é mostrar que a massa é um invariante e que a inércia e a atratibilidade são propriedades da energia. As respostas dos alunos à questão 1 da filipeta nesta aula indicam que a maioria conseguiu perceber uma diferenciação nos conceitos de massa e energia, promovida pela relatividade restrita. Identificamos nas respostas aspectos relacionados a: (i) massa invariante, (ii) inércia e atratibilidade passam para a energia e (iii) discussão genérica sobre massa e energia. No quadro 5.4.3, mostramos a transcrição das respostas dos alunos, relativas à aula 6.

Nestas respostas dadas pelos alunos, notamos que nas três aulas houve momentos em que eles puderam reter aspectos importantes do curso. É preciso enfatizar que estas respostas não representam o aprendizado dos alunos, uma vez que este instrumento não foi elaborado com o objetivo de entender o *saber aprendido*. O aprendizado conseguido no curso consiste em algo muito mais complexo. Uma avaliação baseada na aprendizagem requereria outro estudo, que não foi nosso alvo de interesse. Estas filipetas são pequenos indícios de momentos pontuais do curso que trouxeram marcas aos alunos, que podem ser associadas ao desempenho do professor.

		respostas dos alunos
massa invariante	aluno 1	... e a massa invariante
	aluno 2	implicações de uma massa invariante e...
	aluno 3	quando se mostrou a invariância da massa
	aluno 4	na discussão sobre a massa ser um invariante
atributos passam para a energia	aluno 5	É a energia e não a massa que carrega os atributos
	aluno 1	Na discussão sobre massa e energia: a inércia como característica da energia...
discussão genérica sobre massa e energia	aluno 6	É que o professor consegue tornar em ensinar um assunto complexo em termos simples. A aula é prazerosa. Entendo tudo, embora é a primeira vez que assisto uma aula de teoria da relatividade
	aluno 7	Discussão sobre a visão clássica e relativística das grandezas (massa, energia, tempo, espaço)
	aluno 8	"Desprazer" em concluir que massa e energia não são a mesma coisa
	aluno 2	... questionamento da possibilidade de "conversão" de massa em energia
	aluno 9	Dicas para discussão e simplificação de algumas fórmulas que aparecem nos livros didáticos
	aluno 10	Entender e realizar (linha de raciocínio) ref. coeficiente relativístico gama (γ)
	aluno 11	A interpretação da equação que relaciona massa com massa de repouso

Figura 5.4.3: Transcrição das respostas dos alunos - aula relatividade

Além das filipetas, os alunos preencheram uma avaliação final do curso, no último dia, anexada no apêndice A. Esta avaliação é mais longa, formada por dez questões e teve o papel de identificar aspectos não só relacionados ao conteúdo, como também à atuação do professor. Foi possível perceber que as aulas do professor envolve uma série de nuances e ingredientes, que não podem ser deixados de lado, pois contribuíram para o sucesso do curso. Na avaliação feita pelos alunos, todos se sentiram satisfeitos com o curso. Havia questões que permitiram que os alunos comentassem sobre o desempenho do professor. Não esperávamos respostas diferentes: todos os alunos enalteceram o empenho dele. Percebemos nestes comentários, atitudes pessoais do professor que contribuíram decisivamente para o sucesso do curso. Transcrevemos, a seguir, algumas das respostas dos alunos para as questões 3 e 5 da avaliação final, bem como os comentários livres. As respostas originais e manuscritas estão anexadas no apêndice B.

(3) Você poderia citar aspectos, aulas, conceitos ou simplesmente exemplos que mais lhe chamaram atenção durante o curso? O que mais lhe chocou, positiva ou negativamente? O que mais lhe surpreendeu, positiva ou negativamente? (pode ser em relação ao conteúdo ou à forma como ele foi apresentado)

R1: *Em minha opinião, não houve pontos negativos. As aulas ministradas pelo professor XXX (nome do prof.) foram magníficas. Explicou todos os temas detalhadamente e tirou dúvidas. Acredito que todos nós, tivemos sorte de tê-lo como nosso professor durante este período.*

R2: *O que mais me chamou atenção no curso foi a discussão sobre os poços e a atividade sobre onda eletromagnética em que a montamos com os palitos. Não tive algo que me chocou mas a maneira como o conteúdo foi apresentado como um todo me surpreendeu, pois foi apresentado com uma linguagem clara e que não tive dificuldade para entender.*

R3: *Durante todo o curso foram feitos "ganchos" com o que havia sido discutido em aulas anteriores. Isso auxilia bastante o "fechamento" da questão. Em vários momentos a dedução matemática partindo de princípios conhecidos traziam uma lógica espantosa ao conhecimento físico.*

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

R1: *Gostei das reflexões sobre o que é ou não absoluto na relatividade. No geral gostei de tudo.*

R2: *Gostei do ambiente propício à interação e a disponibilidade do professor em responder e discutir as dúvidas.*

R3: *Dicas de leitura e atividades que possam ser aplicadas em sala de aula. Sucessivas deduções de fórmulas e leis.*

R4: *Gostei muito das definições do XXX (nome do prof.) e transmite o conhecimento com propriedade.*

R5: *Eu gostei da forma em que foram dadas as aulas e os tópicos, a sequência. Gostei da maneira em que o professor fala e explica, é muito claro.*

R6: *Gostei da dinâmica da aula e como paulatinamente encontramos as respostas que necessitamos partindo do básico que conhecemos.*

Use o espaço abaixo para exercer sua liberdade de expressão. Escreva o que quiser escrever!

R1: *Professor bem elaborado, professor bem capacitado. (...) Mas no geral o Curso foi nota 10. Professor XXX (nome do prof.) muito bem preparado e bem comprometido com o projeto.*

R2: *Quero parabenizar à equipe pelo curso e pelas atividades que proporcionaram momentos de reflexão e que nos fizeram olhar alguns aspectos da física de uma maneira diferente da que vi nos cursos da faculdade mesmo se tratando do mesmo assunto. Parabéns pelo trabalho!*

R3: *Eu achei o curso incrível. Apenas lamento por não ter tido tempo de estudar adequadamente ao longo do curso e espero que consiga estudar a apostila e rever minhas notas de aula em breve para fixar o conhecimento adquirido. Qualquer falha que for apontada no questionário é minha e não de vocês.*

R4: *O prazer pelo curso não se escreve se curte durante ele.*

* * *

AGRADECIMENTO

O objeto de nossa pesquisa é fundamentado no conceito amplo de *Intenção Didática* de Chevallard, que norteia o processo da transposição do saber e envolve os elementos que precisam ser mobilizados para a transposição ocorrer. As cinco componentes que definimos foram motivadas pelo conteúdo de física deste curso em particular. Elas foram fundamentais, mas não são únicas. As atitudes do professor foram importantíssimas, pois fortaleceram e ampliaram a proposta inicial e, com certeza, fizeram toda a diferença.

Gostaria, por isso, de reconhecer essa enorme contribuição que o professor implementador deu à minha pesquisa. Em especial, enfatizar os seguintes aspectos:

- **Disposição do professor.** O professor aceitou dar as aulas sem experiência prévia, num ambiente desconhecido, durante cinco sábados seguidos e voluntariamente.
- **Envolvimento com o curso.** Percebemos que seu envolvimento com o curso foi genuíno e todas as suas aulas foram ministradas com o coração. O professor, em nenhum momento tratou o ato de ensinar como uma obrigação burocrática.
- **Atenção com os alunos.** Notamos a maneira solícita e prestativa com que ele tratava os alunos.
- **Coragem de enfrentar dificuldades.** Esta virtude que observamos, consideramos essencial para um professor numa situação de inovação curricular. Em geral, as dificuldades que professores enfrentam em sala de aula são em relação à indisciplina dos alunos. Neste curso, as dificuldades pelas quais o professor passou dizem respeito ao conhecimento, causando situações estressantes. Ele próprio reconheceu ter se sentido 'apertado' em algumas situações. Entretanto, isto não alterou a sua postura, que foi de extremo equilíbrio, o que engrandeceu seu ato de ensinar.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Não-saber, Saber e Re-saber

O *não-saber*, no âmbito da ciência, foi tratado pelo professor e epistemólogo Gaston Bachelard. Para ele, a ausência de conhecimento não está associada à ausência de estrutura. Por isso, adquirir conhecimento não é simplesmente montar uma rede num espaço vazio. Este espaço vazio não existe, mas está preenchido por estruturas anteriores, ligadas ao senso comum. Bachelard argumenta que

O cientista não vê que a ignorância é um tecido de erros positivos, tenazes, solidários. Não vê que as trevas espirituais têm uma estrutura e que, nestas condições, toda experiência objetiva correta deve implicar sempre na correção de um erro subjetivo. Mas não é fácil destruir os erros um a um. Eles são coordenados. O espírito científico só pode construir destruindo o espírito não científico. (BACHELARD, 1978, p.6).

Ele ainda afirma que para haver uma *reforma subjetiva total*, é necessário haver transformações no interior de estruturas do conhecimento. Não é através de uma *pedagogia fracionada* que a reformulação será feita. No *tecido de erros positivos*, a estrutura da ignorância tem partes racionais, parcialmente tecidas, mas, também, fios com as pontas soltas, que podem ser movidos pela subjetividade. Essas estruturas são entulhadas e cheias de insegurança.

Já o *saber*, está associado a estruturas que são fechadas e auto-contidas. Numa estrutura fechadas há uma cooperação entre os vários conceitos, que reforçam os seus significados mútuos. Uma estrutura fechada é como um objeto que possui uma extensão, no qual os conceitos podem existir simultaneamente. A importância desse tipo de estrutura é

ênfatizada por Machado:

a construção do conhecimento pressupõe o estabelecimento de uma densa rede de interconexões entre as informações, uma apreensão do contexto, uma compreensão do significado, uma visão articulada de todo o cenário de informações, que se torna passível de uma mobilização para a ação. Em síntese, a palavra associada ao conhecimento é teoria, em seu sentido mais nobre, de capacidade de olhar... e ver. (MACHADO, 2000, p.78).

Na física, a transição da mecânica clássica para a relatividade envolve um *re-saber*. Re-saber é reformular a rede. Re-saber é um ato de modificação, necessariamente precedido de uma desconstrução. Re-saber requer alteração da rede inteira e de todas as ligações que nela existem. Saber é aprender e estabelecer relações. Re-saber é desfazer as relações antigas, substituindo-as por novas.

A desarticulação de uma estrutura pré-existente requer uma tensão intelectual. O reordenamento de elementos, quando se completa, é acompanhado de prazer. Nas situações de transição, o conhecimento já estabelecido resiste à mudança e aparecem novamente fios com pontas soltas e errantes, acompanhadas de desconforto. Essa situação fica bastante clara em um dos relatos do professor implementador, de teor reflexivo, produzido após uma aula e transcrito abaixo.

”Essa foi, a meu ver, a semana mais delicada em termos conceituais. É a primeira vez que dou aula de TR. Mesmo que os conceitos estivessem bem sedimentados, em minha cabeça, detectei um problema que certamente afeta nossa prática pedagógica: chamarei tal problema de **folga intelectual**. Quando estamos de posse apenas da parte conceitual, raramente vamos além. Pouca ou quase nenhuma relação além do próprio conceito é estabelecida. Implicações são raríssimas. É a folga que permite estabelecer relações e implicações. É ela que permite a um professor analisar uma questão do aluno, submetê-la à teoria, criar relações e ver implicações, não apenas teóricas, mas também epistemológicas, metodológicas ou mesmo ontológicas. Nesta aula, principalmente na de TR (quadrivetor, intervalo relativístico etc), minha folga era muito pequena e, portanto, senti algum desconforto para desenvolver o assunto.”(relato geral da TLS - aulas 4 e 5, anexado no apêndice C).

O curso que desenvolvemos contemplou tanto o *saber*, nas tarefas e atividades **tipo meio**, quanto o *re-saber*, nas **tipo fim**. Desde o início, os conteúdos *tipo fim* orientaram todo o processo. Como já mencionamos anteriormente, o professor implementador tinha grande experiência e competência no que estamos chamando de *saber*. Contudo, ministrar este curso foi sua primeira experiência intensiva com o *re-saber*. Talvez isso explique os resultados mostrados nas três tabelas do capítulo 6.2, que o número de ocorrências das componentes da ID em tarefas **tipo fim** aumentou a medida que o curso se desenvolvia.

A administração do processo que vai do *saber* ao *re-saber* requer, do professor, um conhecimento de epistemologia. A ação epistemológica requer vivência no ensino. Vivência para ver a *extensão* do conhecimento. Vivência para percorrer as ligações que atribuem significados aos conceitos. Vivência para um mergulho ontológico dentro de um conceito, explorando a dimensão *profundidade*. Esta vivência toda constrói uma espécie de **lastro**, que um professor precisa ter para navegar nos mares revoltos de suas aulas. Mesmo que o saber a ser transmitido em uma aula seja pequeno, é preciso que ele saiba mais do que aquilo que ele ensina. Esta **folga intelectual** associada ao lastro, sustenta a ação do professor, dentro da sala de aula. Em situações imprevistas, como questionamentos feitos pelos alunos, o lastro garante a estabilidade e a folga, a tranquilidade. O lastro dá **peso** à palavra do professor e o torna convicto em seu discurso.

6.2 Sugestões para um Re-design

Quando descrevemos a metodologia DBR/TLS, no capítulo 2, comentamos que os resultados advindos do processo poderiam ser incorporados num outro *design*, realimentando o ciclo. Após um *re-design*, a TLS poderia ser melhorada e implementada novamente. A nossa questão de pesquisa está relacionada ao desempenho do professor implementador e não, na avaliação do curso em si. Por isso, nossas contribuições destacam fatores que poderiam tornar mais fácil a atuação de um professor, numa segunda implementação. Estas próximas implementações não precisam ser feitas pelo mesmo grupo de *design* e, tampouco, pelo mesmo professor. O objetivo da pesquisa baseada em *design* é melhorar o processo e, com um resultado, produzir um conhecimento didático, que possa ser divulgado e incorporado num corpo maior de conhecimento de ensino de física.

No nosso caso, o *re-design* deste curso deveria envolver o acréscimo, no *manual de instruções* da TLS oferecido ao professor, dos seguintes complementos:

1⁰) Explicação de características epistemológicas do curso

Para ser colocada no início do manual de instrução do professor implementador, antes da descrição de cada aula. Esta explicação seria feita com base na descrição do curso que fizemos na seção 3.1. Seria interessante mostrar a figura 3.2.1 e descrever sucintamente a razão de ter elementos tipo fim e tipo meio, para garantir a característica teleológica da narrativa didática.

2⁰) Explicitação da Intenção Didática do curso

Nesta experiência nossa concluída, tínhamos consciência das intenções didáticas, porém, elas não foram explicitamente transmitidas ao professor implementador. Acreditamos que, se isso tivesse sido feito, ele poderia ter aprendido o nexos global do curso e a relação deste nexos com as várias aulas. A nossa sugestão é que, no início do manual, sejam colocadas informações que esclareçam a *Intenção Didática* e suas componentes.

3⁰) Classificar as tarefas de cada aula

A divisão do conteúdo do curso em tarefas, bem como a sua classificação quanto à funcionalidade, **tipo meio** ou **tipo fim**, foi feita na fase de nossa análise, após a implementação. Acreditamos que a consciência explícita da natureza dessas tarefas pode ajudar o professor a incorporar melhor a intenção didática e as características epistemológicas do curso. Por isso, achamos que acrescentar a lista de tarefas e a classificação de cada uma delas no manual, junto com os *momentos sugeridos* de cada aula, permitiria um melhor planejamento por parte do professor implementador. Estas listas de tarefas, similares às que empregamos na análise, podem funcionar como **ementas** das aulas, dando maior clareza do papel da intenção didática em cada uma delas. Elaboramos a lista de tarefas para as outras quatro aulas e as apresentamos no apêndice D.

6.3 Conclusões

A nossa questão de pesquisa esteve relacionada ao desempenho de um professor numa situação de inovação curricular. Localizamos esta questão no processo de ensino, de uma maneira mais ampla, com a Teoria da Transposição Didática de Chevallard. Usamos o conceito de *Intenção Didática* desta teoria para acompanhar o percurso epistemológico de um *saber* pertencente à física. Ao verificar a quase total ausência do ensino da fórmula $E = mc^2$ e suas implicações, tanto em livros didáticos, quanto na grade curricular do curso de licenciatura do IFUSP, tivemos a iniciativa de criar um processo de transposição deste tema, desde a organização e escrita do conteúdo até a sua implementação em sala de aula.

Após um material sobre o tema **massa** ter sido escrito, que o consideramos pertencer à 2^a esfera de saber de Chevallard, o *saber a ensinar*, utilizamo-nos da metodologia da pesquisa baseada em *design* para desenvolver uma sequência didática, direcionada a professores de física. Durante o processo de confecção do curso, uma *intenção didática* es-

teve sempre presente. Nossa questão de pesquisa estava voltada para a implementação da sequência e para investigar o quanto o professor implementador manifestaria esta *intenção* em suas aulas.

O professor implementador foi preparado para aquele conteúdo, através de três ações: (i) o acesso ao material escrito antes do *design*, (ii) participação de reuniões de *design* e (iii) colaboração na confecção do *manual de instrução* do curso.

Dada a dificuldade de definir a *Intenção Didática* do curso, criamos cinco componentes, que juntas compõem a ID: *Matemática*, *Ordenamento*, *Significação*, *Epistemologia* e *Re-significação*. Estas componentes foram consideradas suficientemente abrangentes para caracterizar a natureza do conhecimento físico e foram objeto de nossa observação na análise das aulas do professor implementador. Constatamos, após a análise, que existe uma correlação da dificuldade em manifestar tais componentes, com o conteúdo inovador. A medida que o curso progredia e o conteúdo de física moderna passava a entrar nele substancialmente, foi possível notar a dificuldade do professor em manifestar a ID de uma maneira geral. Foi possível relacionar, também, esta dificuldade com a falta de experiência do professor em ensinar aquele conteúdo. Notamos que as duas últimas componentes, *Epistemologia* e *Re-significação*, requerem mais experiência por parte do professor. Esse tipo de experiência constitui uma espécie de *lastro*, que só pode ser adquirido a partir de vivências, associado, também, ao que o próprio professor chamou de *folga intelectual*.

Estes resultados, embora localizados e advindos apenas de um estudo de caso, podem apontar para questões mais gerais, no que diz respeito ao processo de ensino como um todo. Muito se discute sobre a inserção de física moderna no currículo brasileiro e pesquisas existentes nesta temática mostram que introduzir tópicos diferentes no currículo interfere na prática dos professores (PINTÓ, 2005; DAVIS, 2003; CARVALHO e PÉREZ, 2001; FREITAS e VILLANI, 2002). Uma inovação curricular envolve tanto mudanças em estruturas curriculares já existentes, como também recontextualização de conteúdos já conhecidos. No nosso estudo de caso, os temas que constituem o curso que o professor implementou não são, na sua totalidade, inovadores. Contudo, podemos considerar que a abordagem e a organização que demos a eles são inovadoras e diferentes das encontradas nos livros-texto atuais. Frente a uma situação de inovação, o professor fica dividido entre propostas inovadoras e suas próprias concepções, o que causa um distanciamento entre o planejamento do curso e a prática realizada em sala de aula (GARRIDO e CARVALHO, 1999). Este distanciamento não é algo racional ou proposital, mas acontece involuntariamente na

ação do professor. No caso do ensino da física, ele pode, também, estar relacionado com algo intrínseco à natureza do conhecimento físico. Assim, uma inovação de conteúdo pode gerar comportamentos e atitudes dos professores de física que se tornarão obstáculos para o próprio processo de inovação (PÉREZ, 1991). Siqueira (2012) destaca que resultados das pesquisas da década de 1980 levantam alguns obstáculos à inserção de física moderna, tais como a necessidade de formação de professores, a falta de materiais instrucionais, falta de consenso metodológico e formalismo matemático sofisticado. Ele afirma, ainda, que muitas destas dificuldades já foram superadas em ações posteriores. Estes obstáculos, citados por ele, são de natureza didática e estratégica e parecem obstáculos externos ao conhecimento.

A nossa pesquisa, entretanto, indicou a existência de um outro tipo de obstáculo, de natureza internalista. No nosso curso, o professor implementador foi escolhido no curso piloto que eu ofereci alguns meses antes, por ter se destacado dentre 33 professores. O processo do qual ele participou foi diferenciado, na medida que seu contato com o tema aconteceu em três momentos. Primeiramente, por ter assistido o curso piloto e conhecido a temática na sua íntegra. Já na condição de professor implementador, ele teve acesso aos materiais instrucionais, na forma de *apostila de apoio* e *manual de instruções*. Por fim, ele participou do *design*, que se estendeu por 4 meses.

Após a análise da implementação, verificamos que as dificuldades que este professor teve para conduzir a *intenção didática* do curso estão relacionadas a aspectos internos ao conhecimento. Ou seja, elas não são de natureza didática, pedagógica ou estratégica, mas sim, de natureza epistemológica. A nossa pesquisa indicou que existem algumas habilidades essenciais que um professor deverá mobilizar para ensinar física moderna.

A nossa pesquisa mostrou uma pequena ponta de um iceberg. Seus resultados permitem olhar, novamente, para o processo de ensino e refletir sobre algumas questões relacionadas à transposição didática. A transposição de conteúdos de física moderna, naturalmente, constitui um problema de difícil superação para os professores (SHINOMIYA, 2013). Não se pode esquecer que, embora hoje já existam livros didáticos que abordam os temas, um professor do ensino médio que vá ensinar física moderna, geralmente, não é submetido a um processo que o capacite. Fica sob sua responsabilidade se auto-instruir, a partir dos materiais didáticos à sua disposição, como livros, reportagens, artigos, vídeos, filmes, simulações na internet, etc. Esse professor faz parte do processo da transposição, na esfera do *saber ensinado*, que já se iniciou duas esferas antes dele e inúmeros fatores da *noosfera* já determinaram os materiais a serem empregados, antes de eles chegarem às suas mãos. Por

isso, oferecer a um professor materiais didáticos sobre temas de física moderna não garante o sucesso da inserção deles na sala de aula. A transferibilidade de materiais instrucionais e, mesmo de sequências didáticas, sem levar em consideração todas estas questões do processo de ensino, pode ser uma medida educacional inócua. Quanto maior for a inovação curricular, maior será a resistência à difusão do material e, menor a sua transferibilidade. A transformação de *saber* em *re-saber* deve ocorrer, antes de mais nada, no próprio professor.

Espera-se que este professor possa ter autonomia de criar e fazer sua própria transposição, ficando menos dependente de materiais didáticos e exercendo a *vigilância epistemológica*. De que forma o professor pode realizar a *vigilância*, se sua formação não o aproxima do *saber sábio*?

Os resultados da minha pesquisa indicam que esta aproximação é necessária e urgente. Esperamos que eles sirvam de base para a elaboração de propostas que contribuam para a solução destas questões.

Referências Bibliográficas

ALVES, R. **Filosofia da Ciência: introdução ao jogo e suas regras**. Editora Brasiliense, 1981.

ALVES PINHO, J.F. Regras de Transposição Didática Aplicada ao Laboratório Didático, **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.17, n.2, p.174-188, 2000.

ARRIASSECQ, I. e GRECA, I. M. A teaching-learning sequence for the Special Relativity Theory at high school level historically and epistemologically contextualized. **Science and Education**, v.21, p.827-851, 2004.

ARTIGUE, M. Ingénierie didactique. **Recherches en didactique des Mathématiques**, v.9, n.3, p.281-308, 1988.

ARTIGUE, M. Didactical engineering as a framework for the conception of teaching products. In: BIEHLER, R. E. A. (Ed.). **Didactics of Mathematics as a Scientific Discipline**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, p.27-39, 1994.

ASTOLFI, J.P. E DEVELAY, M. **A didática das ciências**, 4^a ed, Campinas, SP, Papirus, 1995.

ASTOLFI, J. P. El Aprendizaje de Conceptos Científicos: aspectos epistemológicos, cognitivos y lingüísticos. **Enseñanza de las Ciencias**, v.6, n.2, pp.147-155, 1988.

AUSEBEL, D.P.; NOVAK, J. e HANESIAN, H. **Educational Psychology: a cognitive view**. [S.I.]: 2^a edição, New York, Holt Rinehart and Winston, 1978.

BACHELARD, G. **A Filosofia do Não: Filosofia do Novo Espírito Científico**. Tradução de Joaquim José Moura Ramos. São Paulo: Abril Cultural, 1978.

BECHARA, M. J.; DUARTE, J.L.M.; ROBILOTTA, M.R. e SALÉM, S. **Apostila de Física 4**, Notas de aula, Instituto de Física da USP, São Paulo, 2008.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Ministério da educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Brasília, 1999.

BRASIL. **PCN+ Ensino Médio - Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

BROCKINGTON, G. **A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para alunos do Ensino Médio**. São Paulo, USP. Dissertação de Mestrado, 2005.

BROUSSEAU, G. Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. **Recherches en Didactique des mathématiques**, v.7, no 2, pp. 33-115. Grenoble, 1986.

BROWN, A. Design experiments: theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. **The Journal of the Learning Science**, v. 2, n. 2, p. 141-178, 1992.

BUTY, C. e TIBERGUIEN, J-F. M. Learning hypotheses and an associated toll to design and to analyse teaching-learning sequences. **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.579-604, 2004.

CANÃS, A.J. et al. **A Summary of Literature of Pertaining to the Use of Concept Mapping Techniques and Technologies for Education and Performance Support**. [S.I.], 2003.

CAVALCANTE, M. A. O ensino de uma NOVA FÍSICA e o exercício da cidadania. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, V.21. n.4, p.550-551, dez.1999.

CARVALHO, A. M. e GIL-PÉREZ, D. **A formação de professores de ciências: tendências e inovações**. 6ª edição, São Paulo: Cortez, 2001.

CHEVALLARD, Y. **La Transposicion Didactica**: Del saber sabio al saber enseñado. Argentina: La Pensée Sauvage, 1991.

_____. Analyse des Pratiques Enseignantes et Didactique des Mathématiques: l'approche anthropologique. **Recherches em Didactique des Mathématiques**, v.19. n.2, p.221-265, 1999.

COLLINS, A. **Toward a design science of education**. In E. Scanlon e T. O'Shea

(Eds.), New directions in educational technology. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

COLLINS, A. e JOSEPH, D.; BIELACZYK, K. Design research: Theoretical and methodological issues. **Journal of the Learning Sciences**, v. 13, n. 1, p. 15-42, 2004.

COSTA, I. e SANTOS, M. A física moderna e contemporânea na sala de aula da escola média. In: **Anais do XIII Simpósio Nacional de Ensino de Física**, Brasília, 1999.

CUSTÓDIO, A. É possível levar a física quântica para o ensino médio. In: **XIII Simpósio Nacional de Ensino de Física**, Brasília, 1999.

DAVIS, K. Change is hard: What science teachers are telling us about reform and teacher learning of innovative practices. **Science Education**, v.87, n.1, p.3-20, 2003.

DBR-COLLECTIVE. Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. **Educational Researcher**, v.32, n.1, p.5-8, 2003.

DERBENTSEVA, N. ; SAFAYENI, F. e CANÃS, A. Concept Maps: Experiments on Dynamic Thinking. **Journal of Research in Science Teaching**, v.44, n.3, p.448-465, 2007.

DEVELAY, M. **De l'apprentissage à l'enseignement: pour une épistémologie scolaire**. Paris, ESF, 1995.

DIOGO, R.C.; OSÓRIO, A.S.; SILVA, D.R.R. A Teoria Antropológica do Didático: Possibilidades de Contribuição ao Ensino de Física. In: **VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, Florianópolis - SC, 2007.

EDELSON, D. C. Design research: what we learn when we engage in design. **The Journal of the Learning Science**, v. 11, n. 1, p.105-121, 2002.

EINSTEIN, A. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Editora Contraponto, 1999.

EINSTEIN, A. e INFELD, L. **A evolução da física**. Editora Zahar, 1938.

FORATO, T. C. de M. **A Natureza da Ciência como Saber Escolar: um estudo de caso a partir da história da luz**. Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FOUREZ, G. Crise no Ensino de Ciências? **Investigações em Ensino de Ciências**, v.8, n.2, p.109-123, 2003.

FREITAS, D.; VILLANI, A. Formação de Professores de Ciências: um desafio sem limites **Investigações em Ensino de Ciências**, v.7, n.3, p.215-230, 2002.

GARRIDO, E.; CARVALHO, A. M. Reflexões sobre a prática e qualificação da formação inicial docente. **Cadernos de Pesquisa**, v.107, p.149-168, 1999.

GAUTHIER, C. et al; **Por uma teoria da Pedagogia: pesquisas contemporâneas sobre o saber docente**, Ijuí: Unijuí, 1998.

GIL, D. P.; SENENT, F.; SOLBES, J. La introducción a la Física Moderna: um ejemplo paradigmático de cambio conceptual. **Enseñanza de las ciencias**. Barcelona: p.209-210, n. extra, 1987.

GIL-PÉREZ, D. Que hemos de saber y saber hacer los profesores de ciencias? **Enseñanza de las ciencias**, Barcelona, v.9, n.1, p.69-77, 1991.

GRECA, I. e MOREIRA, M. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da Mecânica Quântica introdutória. **Investigações em Ensino de Ciência**, vol. 6, nº1, 2001.

IFUSP. **Manual do curso de licenciatura 2011**. Disponível em <http://web.if.usp.br/cg>, acesso em: 08/11/2011.

HECHT, E. On Defining Mass. **The Physics Teacher**, v.49, p.40-43, 2011.

_____. There is No Really Good Definition of Mass. **The Physics Teacher**, v.44, p.40-45, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. e WALKER, J. **Fundamentos da Física**, vol.4, 4ª Edição. Editora LTC, 1993.

HAY, D.; KINCHIN, I. e BAKER-LYGO, S. Making learning visible: the role of concept mapping in higher education. **Studies in Higher Education**, v.33, n.3, p.295-311, 2008.

KABAPINAR, F., LEACH, J. e SCOTT, P. The design and evaluation of a teaching-learning sequence addressing the solubility concept with Turkish secondary school students. **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.635-652, 2004.

KARAM, R. A. S. **Estruturação Matemática do Pensamento Físico no Ensino:** uma ferramenta teórica para analisar abordagens didáticas. Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

KATTMANN, U., DUIT, R., GROPPENGIEBER, H. and KOMOREK, M. A model of Educational Reconstruction. Paper presented at The NARST annual meeting, San Francisco, CA, 1995.

KITTEL, C.; KNIGHT, W. e RUDERMAN, M. **Curso de Física de Berkeley**, vol.1, Editora Edgard Blücher LTDA, 1973.

KNEUBIL, F. B. **As Facetas do Conhecimento Físico e um Modelo: a Luz e a Matéria**. Dissertação de Mestrado, IFUSP, 2006.

KOMOREK, M. e DUIT, R. The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.619-633, 2004.

KUHN, T. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. Editora Perspectiva, 6ª edição, São Paulo, 1962.

LAWALL, I., PIETROCOLA, M., RICARDO, E., SHINOMIYA, G., SIQUEIRA, M. Dificuldades de professores em Física em situação de Inovações Curriculares e em Curso de Formação, XII EPEF, Águas de Lindóia, 2010.

LIJNSE, P. "Developmental research" as a way to an empirically based "didactical structure" of science. **Science Education**, v.79, n.2, p.189-199, 1995.

LIJNSE, P. Methodological aspects of design research in physics education. In K. Kortland e K. Klaassen (Eds.), **Designing Theory- Based Teaching-Learning Sequences for Science Education** (Utrecht: CDBeta Press), p.144-155, 2010.

LIJNSE, P. e KLAASSEN, K. Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.537-554, 2004.

LOPES, A.C. e MACEDO, E. **Teorias de Currículo**. Editora Cortez, São Paulo, 2011.

LÜDKE, M. e ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitati-**

vas. São Paulo: E.P.U., EDUSP, 1986.

MACHADO, N. J. **Educação: Projetos e Valores**. Coleção Ensaios Transversais. Escrituras Editoras, 2000.

MACHADO, N. J. **Epistemologia e Didática - As concepções de conhecimento e inteligência e a prática docente**. 5ª Edição, São Paulo: Editora Cortez, 2002.

MARTINAND, J.L. La question de la référence en didactique du curriculum, **Investigações em Ensino de Ciências**, v.8(2), p.125-130, 2003.

MARTINS, R. Mayer e a conservação da energia. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v.6, p.63-95, 1984.

_____. Como não escrever sobre a História da Física - um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.23, n.1, p.113-129, 2001.

MÉHEUT, M. e PSILLOS, D. Teaching-learning sequences: Aims and tools for science education research. **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.515-535, 2004.

MÉHEUT, M. Designing and validating two teaching-learning sequences about particle models. **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.605-618, 2004.

MEURIEU, P. **Aprender...sim, mas como?** Tradução de Vanise Dresch. 7 ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.

MOREIRA, M. A. Mapas Conceituais. **Caderno Catarinense de Ensino de Física - Florianópolis/UFSC**, v.3, n.1, 1998.

_____. A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, o Ensino de Ciências e a Pesquisa nesta Área. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.7(1), p.7-29, 2002.

_____. Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/moreira/mapasport.pdf>, 2003.

_____. **Mapas conceituais e Diagramas V**. Editora Moraes, Porto Alegre, 2006.

MOREIRA, M. A. e VALADARES, E. C. Ensinando Física Moderna no segundo grau:

efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. **Caderno Catarinense de Ensino de Física** - Florianópolis/UFSC, v.15, n.2, p.121-135, 1998.

NICOLAU, J. Estrutura Didática baseada em fluxo - sequência de ensino aprendizagem de Relatividade Restrita: Paradoxo dos Gêmeos. Texto para Qualificação do Mestrado. São Paulo: IF/FEUSP, 2013.

NOVAK, J. D. **Learning, creating and using knowledge: concept maps as facilitative tools in schools and corporations**. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1998.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de Física Básica**, vol.4, Editora Diversos, 1998.

OKUN, L.B. The Concept of Mass, **Physics Today**, v.42, n.6, p.31-36, 1989.

ORANGE, Christian. Didactique de l'Informatique et Pratiques Sociales de Référence. **Revue de l'EPI**, n.60, décembre, 1990.

OSTERMANN, F., CAVALCANTI, C. J. H. Física moderna e contemporânea no ensino médio: elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 3, p. 267-286, dez, 1999.

OSTERMANN, F; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo desta problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, V.18, n.2, p135-151, 2001.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. Relatividade Restrita no Ensino Médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.21, n.1, p.83-102, abr., 1999.

PAIS, A. "Sutil é o Senhor..." a Ciência e a Vida de Albert Einstein. 5ª Reimpressão, Editora Nova Fronteira, 1982.

PATY, M. **A Matéria Roubada**. Editora da USP, São Paulo. 1995.

PEDUZZI, L. O. Q. Sobre a Utilização Didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, M (org). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001.

PERRENOUD, P. **Práticas pedagógicas, profissão docente e formação**. Perspectivas Sociológicas. Lisboa: Dom Quixote, 1993.

PERRENOUD, P. Construir Competências é Virar as Costas aos Saberes? **Pátio - Revista Pedagógica**. Porto Alegre, n.11, novembro, p.15-19, 1999.

PESSANHA, M. C. A. **Estrutura da Matéria na Educação Secundária: Obstáculos de Aprendizagem e o Uso de Simulações Computacionais**. Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do pensamento físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, V.19, n.1, p.93-114, 2002.

_____. **Inovação Curricular em Física: Transposição Didática de Teorias Modernas e a Sobrevivência dos Saberes**. Projeto Temático enviado à FAPESP, 2008.

_____. **Inovação Curricular e Gerenciamento de Riscos Didático-Pedagógicos: o ensino de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na escola média**. Texto de Erudição para obtenção do título Professor Titular; São Paulo - Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo: Nupic - www.nupic.fe.usp.br., 2010.

PIETROCOLA, M., RICARDO, E., SIQUEIRA, M., LAWAL, I. Teachers Perception of Curricula Content Innovation. In: ESERA-2009, 2009, Istambul. Esera Conference proceedings, p. 1-4, 2009.

PINTÓ, R. Introducing Curriculum Innovations in Science: identifying teachers' transformations and the design of related teacher education. **International Journal of Science Education**, v.89, p.38-55, 2005.

PSILLOS, D., TSELFES, V. e KARIOTOGLOU, P. An Epistemological analysis of the evolution of didactical activities in teaching-learning sequences: the case of fluids. **International Journal of Science Education**, v.26, n.5, p.555-578, 2004.

RAMOS, P. **Ambiente Virtual Vivências: análise do processo de desenvolvimento na perspectiva da pesquisa baseada em design**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

RICARDO, E. **Elementos físicos e matemáticos da mecânica analítica, a relação entre as duas ciências e a vigilância epistemológica**. Tese de Livre-Docência. Faculdade de Educação da USP, São Paulo, 2012.

RICARDO, E. C; ZYLBERSZTAJN, A. O Ensino das Ciências no nível médio: Um Estudo sobre as dificuldades na Implementação dos PCN+. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, V.19, n.3, p.351-370, 2002.

RICHEY, R. C.; KLEIN, J. D.; NELSON, W. A. Development research: studies of instructional design and development. In: JONASSEN, D. H. **Handbook of research on educational communications and technology**. New Jersey: LEA, 2004.

HERNÁNDEZ, M. I. e PINTÓ, R. **Desenvolupament iteratiu d'una seqüència d'ensenyament i aprenentatge sobre Propietats Acústiques dels Materials**. Tese de Doutorado, Universitat Autònoma de Barcelona, Espanha, junho, 2012.

SALÉM, S. **Estruturas Conceituais no Ensino de Física, uma aplicação à eletrostática**. Dissertação de mestrado em ensino de ciências, IFUSP, 1986.

SHINOMIYA, G. K. **Saberes e Práticas Docentes para a Inovação Curricular: uma análise das práticas da sala de aula**. Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SHULMAN, L. S. **Those who understand: knowledge growth in teaching**. Educational Researcher, 15 (2), p. 4-14, 1986.

SIQUEIRA, M. R. **Do Visível ao Indivisível: uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SIQUEIRA, M. R. **Professores de Física em contexto de inovação curricular: saberes docentes e superação de obstáculos didáticos no ensino de física moderna e contemporânea**. Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOUSA, W. B. **Física das Radiações: uma proposta para o Ensino Médio**. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SYMOM, K. R. **Mecânica**, 4ª Edição, Editora Campus, 1982.

TARDIF, M. **Saberes Docentes e Formação Profissional**. Petrópolis: Vozes, 2012

TERRAZZAN, E. A. **Perspectivas para a inserção de física moderna na escola média**. São Paulo: curso de pós-graduação em educação - USP. Tese, 1994.

THEIN, A. H.; BARBAS, P.; CARNEVALI, C.; FOX, A.; MAHONEY, A.; VENSEL, S. The Affordances of Design-Based Research for Studying Multicultural Literature Instruction: Reflections and Insights from a Teacher-Researcher Collaboration. **English Teaching: Practice and Critique**, v. 11, n. 1, p. 121-135, 2012.

TIBERGHIE, A. Designing teaching situations in the secondary school. In R. Millar, J. Leach and J. Osborne (eds.) **Improving Science Education - The Contribution of Research** (Buckingham: Open University Press), p.27-47, 2000.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 2009.

UHDEN, O.; KARAM, R.; PIETROCOLA, M. e GESCHE, P. Modelling Mathematical Reasoning in Physics Education. **Science & Education**, v.21, p.485-506. 2012.

VALADARES, J.A. O Conceito de Massa. I. Introdução Histórica e II. Análise do Conceito, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.15, n.1, p.110-127, 1993.

VAN DEN AKKER, J. Principles and methods of development research. In: VAN DEN AKKER, J. et al. (Eds.). **The Design methodology and developmental research in education and training**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, p. 1-14, 1999.

VILLANI, A; DIAS, V.; VALADARES, J. (2009). The Development of Science Education Research in Brazil and Contributions from the History and Philosophy of Science. *International Journal of Science Education*, v.32, pp.907-937.

VILLANI e ARRUDA. Special Theory of Relativity, Conceptual Change and History of Science. **Science and Education**, vol. 7 (1) pp. 85-100, 1998.

WANG, F.; HANNAFIN, M. J. Design-based research and technology-enhanced learning environments. **Educational Technology Research and Development**, v. 53, n. 4, p. 5-23, 2005.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

FABIANA BOTELHO KNEUBIL

**O PERCURSO EPISTEMOLÓGICO DOS SABERES
E A
EQUIVALÊNCIA MASSA-ENERGIA**

Tese apresentada à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Educação.

Área de Concentração: Ensino de Ciências e Matemática
Orientador: Prof. Dr. Maurício Pietrocola

VOL II: ANEXOS

São Paulo
2014

Sumário

Apêndice A - Manual de Instrução para o professor	1
Aula 0 - Universo Físico Clássico	3
Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica	5
Ativ. 1A e Gabarito - Massa e Gravitação	7
Ativ. 1B e Gabarito - Massa e Inércia	9
Trecho do livro 2001 Odisseia Espacial, de Arthur C. Clarke	11
Ativ. 1 - Casa e Gabarito	12
Aula 2 - Sistemas Ligados e Átomo de Hidrogênio	15
Ativ. 2A e Gabarito - Experimento de mecânica	17
Ativ. 2B e Gabarito - Estados excitados	19
Ativ. 2C e Gabarito - Sistema mecânico x Átomo de hidrogênio	22
Aula 3 - Energia e Momento no Eletromagnetismo	25
Instruções para montagem do kit 'ondas eletromagnéticas'	27
Ativ. 3A e Gabarito - Ondas Eletromagnéticas e a Energia	32
Roteiro da Ativ. 3 - Casa	33
Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação	35
Ativ. 4A e Gabarito - Radiações e a 3ª Lei de Newton	37
Aula 5 - Relatividade: absolutos e relativos	41
Ativ. 5 - Casa e Gabarito	42
Aula 6 - Relatividade: energia e massa	51
Ativ. 6 e Gabarito - Absolutos e relativos	52
Aula 7 - $E = mc^2$ em ação...	55
Ativ. 7 e Gabarito - O peso do próton	56

Roteiro da Ativ. 7 - Casa	58
Avaliação final do curso	61
Apêndice B - Filipetas preenchidas pelos alunos	65
Apêndice C - Relatos do professor implementador	74
Apêndice D - Lista de Tarefas das Aulas	81

Apêndice A - Manual de Instrução para o professor

Aula 0 - Universo Físico Clássico

Objetivo

O objetivo dessa aula é organizar os conceitos físicos da mecânica, distinguindo-os quanto a sua natureza. Partindo de um exemplo concreto, o sistema Terra-Sol, os conceitos físicos presentes nesse problema podem ser separados em três categorias: atores, palco e diretor. Essa classificação é de extrema importância para que os alunos percebam o papel de cada entidade física. Após essa organização, recomenda-se aprofundar as três leis de Newton da dinâmica e a lei da gravitação universal. Essas quatro leis expressam ideias muito importantes da mecânica newtoniana e são elementos fundamentais para misturar as entidades físicas do palco com os atores.

Conteúdo Físico

As três leis de Newton. Lei da Gravitação Universal. Espaço e tempo absolutos. O papel da força na mecânica. Campo gravitacional. Sistema Terra-Sol.

Pré-requisitos

As três Leis de Newton, Lei da Gravitação Universal, derivada e vetores.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio para o professor - aula 0 (apêndice)

Momentos Sugeridos

- **1º Momento da Aula 0:** primeira hora da aula

A aula deve ser iniciada com uma proposta de interação com os alunos. Uma pergunta deve ser feita para que eles respondam: "*o que existe no Universo?*" Aos poucos, conforme os alunos respondem, as palavras devem ser escritas na lousa. Devem sair palavras de todos os tipos: cachorro, cadeira, energia, massa, tempo, dinossauro, comida, sexo, amor, cerveja, partículas, etc... Com a lousa cheia de palavras, deve ser feita a segunda pergunta: "*o que a física estuda?*", numa tentativa de fazer um recorte do Universo (que é bem maior). A física estuda algumas coisas e outras não e isso deve ser mostrado aos alunos. Para essa discussão inicial, sugeridos a seguinte leitura: 1º capítulo da *apostila do curso de Física 3*, do Instituto de Física da USP, prof. Manoel Roberto Robilotta.

- **2º Momento da Aula 0:** segunda hora da aula

Após a discussão do que a física estuda, recomenda-se grifar na lousa as palavras que se referem

à física. Diante de todas elas, deve-se transmitir aos alunos uma sensação de 'bagunça' e desorganização, já que podem aparecer palavras da física tais como metais, tempo, quark, interação forte, buraco negro, etc... Uma pergunta motiva a necessidade de uma organização dentro da física: "*essas 'coisas' ou entidades são iguais? Elas exercem o mesmo papel dentro da física?*" Em outras palavras, "*se fôssemos colocar em gavetas, colocaríamos o tempo na mesma gaveta que metais?*" Claramente, a resposta é não. E para discutir essas questões, parte-se de um exemplo concreto como o problema do movimento da Terra em torno do Sol. Para essa segunda metade da aula sugerimos a leitura do 'texto de apoio ao professor - aula 0'.

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica

Objetivo

Na aula inicial do curso foi feita uma classificação e organização das entidades físicas dentro da ideia que todos os fenômenos físicos podem ser comparados a uma peça de teatro, com o palco, diretor e atores. O objetivo dessa aula é discutir o papel das principais entidades físicas no universo da mecânica: energia, força, massa, quantidade de movimento e impulso. Busca-se apresentar a relação entre todas elas, de maneira que seja possível transmitir ao aluno como a **força** é uma entidade importante na mecânica newtoniana. É através da sua ação (ou efeito) que as grandezas energia cinética e momento linear de uma massa podem variar. O objetivo principal é mostrar esses dois efeitos da força sobre a massa e como as propriedades intrínsecas da matéria, a **inércia** e a **atrutibilidade**, estão enraizadas na concepção newtoniana do universo.

Conteúdo Físico

Teorema de Nöether. Teorema da energia cinética. Teorema do impulso. Gravitação.

Pré-requisitos

Quantidade de movimento, choques mecânicos, derivada.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio ao professor - aula 1 (apêndice)
- Roteiro para as Atividades 1A e 1B
- Trecho do livro *2001 - uma odisséia no espaço* para os alunos
- Roteiro para Atividade Extraclasse (lição de casa)
- Gabarito para o professor das Atividades 1A e 1B

Leitura Opcional Sugerida ao Professor

- * Newton I. *Princípios*, vol. , p.
- * Castellani, O. C., *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 23, n.3, p.356, 2001.
- * Kneubil, F. B. *As facetas do conhecimento físico e um modelo: a luz e a matéria*. Dissertação de mestrado, IFUSP, 2006. Pág. 27-57.

* Machado, N. J. *Educação: Projetos e Valores*, p. 101. Editora Escrituras, 1999.

* Moreira, M. A. Mapas conceituais. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.3, n.1, p.17-25. (1986).

Momentos Sugeridos

Essa aula deve ser dividida em cinco momentos, com duas dinâmicas diferentes, uma com a atuação do professor e outra com o trabalho dos alunos. Na primeira dinâmica com a atuação do professor, de aproximadamente uma hora, haverá exposição do tema pelo professor e a segunda dinâmica, com participação dos alunos, de aproximadamente uma hora, haverá o trabalho em grupo dos alunos. Ao final, o professor deve fazer um fechamento e dar as instruções para a tarefa extra-classe. O quadro abaixo resume essa divisão e, em seguida, temos as instruções de cada momento.

professor	20 min	1 ^o Momento Prof.
	40 min	2 ^o Momento Prof.
aluno	25 min	1 ^o Momento aluno - Ativ. 1A
	25 min	2 ^o Momento aluno - Ativ. 1B
professor	10 min	3 ^o Momento Prof.

• 1^o Momento Prof.: primeiro terço (aprox. 20 min)

O primeiro passo é localizar a energia em uma daquelas categorias: atores, palco ou diretor. Sugerimos que essa pergunta seja feita à classe. Observa-se que, em geral, os alunos tendem a colocar a energia como ator. Entretanto, deve-se conduzi-los à conclusão que ela não pode ser ator, pois a energia não é considerada uma substância concreta, já que o seu valor é diferente em cada referencial. A principal razão que coloca a energia no palco é o Teorema de Nöether. Além da energia, os momentos linear e angular também estão no palco, associados ao espaço.

• 2^o Momento Prof.: dois terços finais (aprox. 40 min)

Agora com o quadro do universo físico completo, deve-se iniciar a discussão do papel da força e o seu efeito sobre a massa: variação da energia cinética e variação da quantidade de movimento. Para isso, é importante trazer elementos históricos do debate entre Newton e Descartes contra Leibniz. Para enfatizar as propriedades da matéria, relacionadas com os conceitos de massa inercial e massa gravitacional, sugerimos partir, de novo, de um exemplo concreto de aplicação do teorema de energia cinética: o caso do sistema Terra-Sol. Alimentando a força genérica do lado esquerdo do teorema com a força gravitacional, chega-se à conservação de energia. A partir dessa expressão, é possível discutir as propriedades da massa relacionada à inércia, no termo da energia cinética e relacionada à atratibilidade, no termo da energia potencial. Para essa discussão, sugerimos a leitura do texto de apoio ao professor - aula 1 (apêndice).

• 1^o Momento Aluno: aprox. 25 min

Os alunos deverão se dividir em grupos de 4 pessoas para fazer a atividade 1A, anexada a seguir. Esta atividade busca reforçar o aspecto da massa gravitacional e distingui-lo da massa inercial. As

questões devem ser respondidas e discutidas por todos os integrantes do grupo.

• **2º Momento Aluno:** aprox. 25 min

Essa atividade tem com objetivo reforçar o aspecto inercial da massa. As questões devem ser discutidas e respondidas por todos os integrantes do grupo. No item (d) da atividade, os alunos devem fazer um esforço para perceber que a força (que é o agente físico responsável pela variação do momento da bolinha 1) que a bolinha 2 aplica na bolinha 1 está relacionada com a rejeição ao movimento, pois na situação 3, a bolinha 2 não sai do lugar e, portanto, a variação da quantidade de movimento da bolinha 1 é máxima.

• **3º Momento Prof.:** aprox. 10 min

Nesses 10 minutos finais, após todos os grupos terem entregue as atividades, o professor deverá fazer três coisas:

- distribuir o um trecho do livro '*2001 Odisseia Espacial*', de Arthur C. Clarke, e comentar as atividades feitas durante a aula.

- Um '*brain storm*' da aula, solicitando aos alunos que falem todas as palavras/conceitos importantes da aula de hoje. Para isso, os alunos podem consultar suas anotações. O professor deve anotar na lousa essas palavras. **O professor deve, também, reforçar tudo que foi dito, enfatizando os aspectos mais importantes da aula, principalmente os que dizem respeito à organização do universo newtoniano e às propriedades da matéria.** Deve ser dito que **definir massa é algo muito difícil**, por isso, a cercamos de outros conceitos para que um significado maior seja apreendido.

- Com todas essas palavras na lousa, deve ser explicado e distribuído o trabalho extraclasse para os alunos. É uma lição individual que todos devem entregar na semana seguinte. O professor deve explicar a questão e dar uma noção sobre mapas conceituais.

Observação: A 1ª questão do trabalho extraclasse 'Ativ1 casa' sugerido tem como objetivo avaliar e aferir aspectos sobre mapas conceituais e perfil epistemológico da massa, que estão relacionados com os princípios de design desta sequência didática. Por isso, não existe um gabarito ou uma resposta correta. As respostas dos alunos serão transformadas em dados para a pesquisa.

Ativ. 1A e Gabarito - Massa e Gravitação

1) Uma pessoa chuta um bloco maciço de 1kg, obliquamente, em três locais diferentes: no planeta Terra, na Lua e no espaço sem gravidade. As figuras abaixo ilustram as três situações.

(a) Descreva o que acontece com o bloco nas três situações.

Se o menino chutar o bloco nas três situações da mesma maneira, ou seja, com a mesma força, promovendo-lhe um impulso, o bloco irá sair da mesma forma, com a mesma velocidade nas três situações. Pois se o impulso é o mesmo, a variação da quantidade de movimento do bloquinho também será igual. Veja que esse problema está relacionado com o aspecto inercial da massa, portanto, em locais com campo gravitacional diferentes não interferem em nada no resultado da interação entre o pé do menino e o bloco.

(b) Em qual das três situações a dor que ele sente no pé é maior? Justifique.

A dor que o jovem sente no pé é igual nas três situações! Essa dor depende exclusivamente da reação da força que ele aplica no bloco, ou seja, da força que o bloquinho aplica sobre o seu pé. Essa força não depende da gravidade local, pois está relacionada com o aspecto inercial da massa.

2) (a) Das situações descritas abaixo, identifique qual aspecto da matéria que mais interfere no fenômeno descrito. Coloque (MI) para massa inercial ou (MG) para massa gravitacional.

(gravit) Na Lua, onde a gravidade é cerca de seis vezes menor que a da Terra, um corpo é facilmente suspenso e têm-se uma boa sensação de peso menor.

(inercial) Um corpo de massa m acoplado a uma mola, num plano horizontal sem atrito, oscila sob a ação de uma força restauradora, com um período T constante e uma velocidade que varia com o tempo.

(inercial) Um automóvel ao realizar uma curva com velocidade constante na Terra sente a mesma dificuldade em alterar a direção da sua velocidade que na Lua.

(gravit) Uma massa quando lançada sob um ângulo de 45° com a horizontal atinge um alcance máximo.

(b) Proponha um experimento para se medir a massa de um corpo num espaço sem gravidade.

Num local onde não existe campo gravitacional não poderíamos medir a massa colocando-a numa balança. Essa forma de medir a massa está relacionada com a massa gravitacional e, portanto, seria impossível medi-la num local onde $g = 0$. É preciso, então, pensar num experimento onde o aspecto da

massa inercial seja evidente. Por exemplo, se colocarmos um sistema massa-mola para oscilar num plano horizontal sem atrito, é possível medir o período de oscilação. Para esse sistema oscilante, o período vale $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Portanto, sabendo a constante elástica da mola e medindo o período, é possível saber o valor da massa m .

Ativ. 1B e Gabarito - Massa e Inércia

Nas três situações representadas na figura abaixo, duas bolinhas se chocam, em um plano horizontal sem atrito.

Considerando os choques perfeitamente elásticos, a **quantidade de movimento** e a **energia mecânica** se conservam. Então, podemos escrever, para as três situações, que

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

$$m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (A)$$

$$E_{Minicial} = E_{Mfinal}$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (B)$$

Com as eqs.(A) e (B) podemos determinar as velocidades finais das duas bolinhas após a colisão:

Situação 1:	Situação 2:	Situação 3:
$v_{1final} = 0$ $v_{2final} = v_1$	$v_{2final} = \frac{2}{3} v_1$ e $v_{1final} = -\frac{1}{3} v_1$	Considerando M muito grande, como uma parede, a bolinha 1 inverte seu movimento. Assim, $v_{1final} = -v_1$

(a) Determine a variação da quantidade de movimento da bolinha 1 nas três situações.

Situação 1:	Situação 2:	Situação 3:
$\Delta \vec{p}_1 = \vec{p}_f - \vec{p}_i$ $\Delta p_1 = 0 - m v_1$ $\Delta p_1 = -m v_1$ $ \Delta \vec{p}_1 = m v_1$	$\Delta \vec{p}_1 = \vec{p}_f - \vec{p}_i$ $\Delta \vec{p}_1 = m \vec{v}_f - m \vec{v}_i$ $\Delta p_1 = -m \frac{1}{3} v_1 - m v_1$ $\Delta p_1 = -\frac{4}{3} m v_1$ $ \Delta \vec{p}_1 = \frac{4}{3} m v_1$	$\Delta \vec{p}_1 = \vec{p}_f - \vec{p}_i$ $\Delta \vec{p}_1 = m \vec{v}_f - m \vec{v}_i$ $\Delta p_1 = -m v_1 - m v_1$ $\Delta p_1 = -2 m v_1$ $ \Delta \vec{p}_1 = 2 m v_1$

(b) Qual é o agente físico que causa a variação da quantidade de movimento de cada bolinha? Faça um desenho representando-o em cada bolinha em apenas uma das situações.

O agente físico que causa a variação de $\vec{p}$ de cada bolinha é a força. No instante do choque, ocorre o contato entre as bolinhas e a bolinha 1 faz um força sobre a bolinha 2 e esta reage fazendo uma força igual e contrária na bolinha 1. Essas forças constituem um par ação-reação e estão desenhadas, separadamente para cada bolinha, na figura abaixo.

Como as forças trocadas entre ambas são iguais, elas promovem o mesmo impulso e, portanto, a variação da quantidade de movimento das duas bolinhas é igual.

(c) Usando os resultados dos itens anteriores, complete a tabela abaixo e responda as questões.

situação	relação entre as massas	$ \Delta p_1 $
1	$m_1 = m_2$	$m v_1$
2	$m_1 < m_2$	$\frac{4}{3} m v_1$
3	$m_1 \ll m_2$	$2 m v_1$

(d) O que se pode concluir sobre o aumento ou diminuição de $|\Delta p_1|$ nas três situações?

A variação da quantidade de movimento da bolinha 1 aumenta!!!

(e) Qual é a explicação física para esse aumento ou diminuição da variação da quantidade de movimento da bolinha 1? Se m_1 é constante, por quê $|\Delta p_1|$ é diferente nas três situações?

Como a massa da bolinha 1 é fixa, o aumento da sua variação da quantidade de movimento não pode depender da massa e sim do impulso que ela recebe. Ora, esse aumento está relacionado, então, com a força que a bolinha 2 faz na bolinha 1, ou seja, é causado pela força $\vec{F}_{21}$ da figura. Isso significa que essa força aumenta da situação 1 para a situação 3. Podemos concluir que essa força é proporcional à massa da bolinha 2, porque ela também aumenta. Conforme a massa da bolinha 2 aumenta, ela aplica uma força maior na bolinha 1 (interessante!). Vemos que na situação 3, quando a massa da bolinha 2 é máxima (como uma parede), ela aplica na bolinha 1 uma força também máxima, causando uma variação máxima na quantidade de movimento da bolinha 1. Podemos interpretar esse resultado do ponto de vista da inércia da bolinha 2. Quando sua massa é muito grande, ela resiste à mudança do seu estado de movimento e fica parada, conforme vimos na situação 3. Essa resistência à mudança do seu estado de movimento pode ser associada à inércia e a força que ela aplica na bolinha 1 é como se fosse uma rejeição ao movimento, ou seja, uma reação à informação de que ela deveria sair daquele lugar.

Trecho do livro 2001 Odisseia Espacial, de Arthur C. Clarke

”Um dos atrativos da base lunar e da Lua em geral era a baixa gravidade, produzindo uma sensação de bem-estar generalizado. Contudo, isso apresentava seus perigos e era preciso que decorressem algumas semanas até que o recém-chegado procedente da Terra conseguisse se adaptar. Uma vez na Lua, o corpo humano via-se obrigando a adquirir toda uma série de reflexos. E pela primeira vez era obrigado a distinguir peso e massa. Um homem de massa 90kg pesa na Terra aproximadamente 900N. Este homem, para sua grande satisfação, descobre que seu peso na Lua é de aproximadamente 150N. Enquanto se desloca em linha reta e com velocidade constante, sente uma sensação maravilhosa, como se flutuasse. Mas assim que resolve alterar o seu curso, virar esquinas ou deter-se subitamente percebe que os seus 90kg de massa, ou inércia, continuam presentes. Pois a massa do corpo é fixa, inalterável, tanto na Terra como na Lua, no Sol ou no espaço. De um modo geral, esse fato somente era compreendido após algumas colisões e alguns apertos de mão demasiadamente violentos. Os antigos habitantes da Lua procuravam manter distância dos recém-chegados até que estivessem aclimatados.”

MASSA INERCIAL E MASSA GRAVITACIONAL

No Principia, a grandeza que representa a quantidade de matéria contida num corpo, que chamamos de massa, possui naturezas diferentes quando aplicamos a 2ª lei de Newton ao campo gravitacional. A igualdade entre a massa inercial e gravitacional foi um mistério na física Newtoniana, sendo apenas aceita por ser fato experimental. Mas em nenhum momento essa igualdade é explicada.

Na verdade a massa m da 2ª lei mede a tendência que o corpo tem para conservar o seu movimento ”natural”(retilíneo e uniforme), o que está de acordo com nossa intuição de que quanto mais massivo for o corpo, mais difícil será tirá-lo do repouso, fazê-lo parar ou mudar sua direção de movimento. Por isso, o nome dado de massa inercial.

Durante algum tempo os pontos relacionados à gravidade estavam obscuros para Newton. Podemos perceber que não é óbvia a analogia entre $F = ma$ e $P = mg$, pois o peso é uma força que atua em um intervalo de tempo muito grande, ou seja, o peso está sempre atuando no corpo e a 2ª lei não se refere a este tipo de força. Mas como resolver este problema se o peso é uma força?

O peso é uma força que também depende da massa do corpo, mas nesse caso, a massa não aparece como uma característica do corpo de preservar o seu ”movimento natural”, já que um corpo submetido à força peso sempre entrará em movimento (queda livre). Ela aparece como uma reação do corpo à ação gravitacional. A essa massa foi dada o nome de massa gravitacional.

Para um corpo em queda livre, devemos ter que $a = g$. Mas ao analisarmos a queda (considerada no vácuo), verificamos que a única força atuante no corpo é o peso, com isso: $F = P$, e $m_i a = m_g g$.

Para que a 2ª lei de Newton seja verdade devemos ter $m_i = m_g$. Na mecânica newtoniana essa igualdade é simplesmente uma coincidência, não havendo nenhuma explicação para esse fato. A natureza nos mostra que existe essa igualdade, pois se isso não fosse verdade, dois corpos abandonados da mesma altura chegariam ao solo em tempos diferentes, logo com velocidades diferentes.

Trecho do artigo: Castellani, O. C., Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, n.3, p.356, 2001.

Ativ. 1 - Casa e Gabarito

1) Retomando o item (e) da 'Ativ.1B - Massa e Inércia' feita em sala, como você explicaria o aumento de $|\Delta p_1|$ da bolinha 1 usando os conceitos de **inércia, força, movimento, massa e resistência**, para uma criança do ensino fundamental? (Lembre-se que para essa criança não existe a noção de quantidade de movimento).

Essa questão tem como objetivo avaliar e aferir aspectos sobre mapas conceituais e perfil epistemológico da massa, que estão relacionados com os princípios de design desta sequência didática. Por isso, não existe um gabarito ou uma resposta correta. Usaremos a resposta de cada aluno para transformá-las em dados para a pesquisa.

MAPAS CONCEITUAIS

Definir conceitos em física nem sempre é uma tarefa fácil. Numa definição, cercamos uma palavra com outras palavras e muitas vezes o desconhecimento de todas elas gera um não-entendimento do conceito que inicialmente era para ser explicado. Por isso, a definição pode não trazer um significado profundo de certos conceitos, principalmente na física que lidamos com conceitos abstratos¹.

Muitos autores defendem que o conhecimento físico está estruturado espacialmente e o significado de um conceito está nas relações dele com outros, e não nele em si. "*Os significados são construídos por meio de relações estabelecidas entre os objetos, as noções e os conceitos. Um significado é como um feixe de relações*"².

Uma das maneiras de organizar os conceitos na física e estabelecer a relação entre eles é através de mapas conceituais. A teoria dos mapas conceituais foi desenvolvida por Joseph Novak na década de 70 e está baseada na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. Hoje, os mapas são usados amplamente no ensino de ciências, pois permitem tanto a análise e organização dos conceitos quanto a avaliação da aprendizagem dos mesmos³.

Veja abaixo um exemplo de um esquema conceitual sobre a **eletrostática**⁴.

¹Kneubil, F. B. As facetas do conhecimento físico e um modelo: a luz e a matéria. Dissertação de mestrado, IFUSP, 2006. Pág. 27-57.

²Machado, N. J. Educação: Projetos e Valores, p. 101. Editora Escrituras, 1999.

³Moreira, M. A. Mapas conceituais. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v.3, n.1, p.17-25. (1986).

⁴Esse esquema foi feito por Sônia Salém em sua dissertação de mestrado "Estruturas Conceituais no Ensino de Física: Uma Aplicação à Eletrostática", 1986.

2) **Construa um esquema conceitual** com todos os conceitos da aula de hoje. Procure fazer a ligação entre todos eles e, para isso, consulte suas anotações de aula para recordar as relações. (Calma!! O da eletrostática é bem mais complexo do que você irá fazer)

Sugestão: Escreva, numa folha de papel, as palavras/conceitos abaixo, recorte cada uma delas e as ordene, sobre uma mesa, na forma de um mapa. Quando o mapa estabilizar, copie-o na folha do trabalho a ser entregue.

U - uniformidade	E - energia	$\vec{p}$ - momento linear
H - homogeneidade	x - deslocamento	$\vec{L}$ - momento angular
I - Isotropia	Δt - intervalo de tempo	$\vec{F}$ - força
E_P - energia potencial	τ - trabalho	$\vec{I}$ - impulso
E_C - energia cinética	M - massa	$\vec{g}$ - campo gravitacional

Mapa conceitual proposto pela equipe de design do curso:

Aula 2 - Sistemas Ligados e Átomo de Hidrogênio

Objetivo

O objetivo dessa aula é discutir os mecanismos físicos que fazem com que um objeto permaneça confinado numa região do espaço. Para isso, sempre existe uma **força** que age nesse objeto e essa aula pretende transformar o entendimento de sistemas ligados para uma linguagem mais abstrata. Parte-se sempre de casos concretos, como sistema massa-mola, bolinha presa por uma corda e, por fim o átomo de hidrogênio. Nesses problemas, a ideia é uma abordagem do ponto de vista do potencial e **não mais** da força. Por isso, o objeto principal dessa aula é a **representação gráfica** dos sistemas ligados e o entendimento de suas energias existentes (cinética e potencial). A discussão central é para o átomo de hidrogênio, mostrando o conceito de **energia de ligação** e os mecanismos para se *quebrar* e *montar* um átomo. A ideia principal dessa atividade é mostrar que um sistema formado de partes (no caso do átomo de hidrogênio, apenas duas partes: elétron e próton) tem uma **energia menor** que as partes separadas, pois para *montar* o átomo, é necessário a liberação de energia através de uma reação exotérmica. Isso pode ser visto nos gráficos de energia. Por isso, a importância de mostrar os gráficos no início da atividade. Essa discussão será retomada na aula 7, quando se discutirá a aplicação do $E = mc^2$ nos sistemas ligados.

Conteúdo Físico

Sistema massa-mola. Energia potencial. Poço de potencial. Níveis de energia de sistemas ligados. Potencial coulombiano. Átomo de Hidrogênio. Estado fundamental e níveis excitados. Reações exotérmicas e endotérmicas.

Conteúdo Epistemológico

Aspectos da natureza da ciência: modelos, fenômenos e teoria.

Pré-requisitos

Aplicação da 2ª lei de Newton. Força Coulombiana. Energia mecânica: cinética e potencial eletrostática.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)

- Texto apoio ao professor - aula 2 (apêndice)
- Roteiro para as Atividades 2A e 2B
- Gabarito para o professor das Atividades 2A e 2B

Leitura Opcional Sugerida ao Professor

* Pietrocola, M. (2002). A matemática como estruturante do pensamento físico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.19, n.1, p.93-114.

Momentos Sugeridos

Essa atividade deve ser dividida em quatro momentos, com duas dinâmicas diferentes, uma com a atuação do professor e outra com o trabalho dos alunos. Na primeira dinâmica com a atuação do professor, de aproximadamente uma hora, haverá exposição do tema pelo professor e a segunda dinâmica, com participação dos alunos, de aproximadamente uma hora, haverá o trabalho em grupo dos alunos. O quadro abaixo resume essa divisão e mostra a ordem dos momentos. Em seguida, temos as instruções de cada momento.

aluno	20 min	1º Momento aluno - Ativ. 2A
professor	45 min	1º Momento Prof.
aluno	20 min	2º Momento aluno - Ativ. 2B
professor	15 min	2º Momento Prof.
aluno	20 min	3º Momento aluno - Ativ. 2C

• 1º Momento aluno: aproximadamente 20 min

O professor deve iniciar essa atividade entregando o 'roteiro da Ativ. 2A' e pedindo que os alunos se dividam em grupos de 4 ou 5 pessoas. Essa atividade coloca um problema de mecânica conhecido para que os alunos reflitam sobre uma determinada situação. Embora pareça um problema simples e conhecido, existe uma abordagem/problemática que será discutida ao final da aula. Ou seja, essa atividade inicial é para estimular e levantar um aspecto relacionado com o tema central (energia dos sistemas ligados) que será explicado posteriormente.

• 1º Momento Prof.: aproximadamente 45 min

Nesse momento da atividade, com a dinâmica de atuação do professor, após os alunos entregarem a atividade 2A, deve-se iniciar uma discussão sobre sistemas ligados. Partindo de casos concretos, como um bolinha presa por meio de mola ou corda, o objetivo é chegar na discussão do caso do átomo de hidrogênio. O enfoque principal dos sistemas é pelos gráficos de energia. Para essa discussão, sugerimos a leitura do texto de apoio ao professor - aula 2 (apêndice).

• 2º Momento Aluno: aproximadamente 20 min

Os alunos deverão se dividir, novamente, em grupos de 4 ou 5 pessoas para fazer uma 2ª atividade: 'roteiro da Ativ. 2B', anexada a seguir. Essa atividade tem com objetivo reforçar os conceitos apresentados pelo professor no momento anterior.

• **2º Momento Prof.:** aproximadamente 15 min

Nesse momento, após a atividade 2B considerada técnica e de fixação do conteúdo, o professor deve fazer uma discussão epistemológica do átomo, enfatizando a **importância dos modelos** para a física. Na dedução da energia total do átomo, parte-se da dimensão teórica do conhecimento científico e, com uma medida experimental da energia de ligação, é possível **saber** (não medir!) outras grandezas microscópicas do átomo, como o raio, a velocidade do elétron, etc.

• **3º Momento Aluno:** aproximadamente 20 min

Ainda com os alunos em grupos, o professor deve entregar o 'roteiro da Ativ. 2B'. Essa atividade, agora, procura fazer uma junção entre o que foi explanado pelo professor e a atividade inicial da aula, a Ativ. 2A. O experimento de mecânica é retomado e, agora, pede-se uma explicação usando os elementos dados naquela atuação do professor. Ou seja, essa atividade final buscar fazer uma **re-significação** do mesmo problema da mecânica para uma interpretação na perspectiva do eletromagnetismo e das energias do átomo.

Ativ. 2A e Gabarito - Experimento de mecânica

Num problema clássico de energia mecânica, um carrinho de massa 500kg, parte do repouso do ponto A em uma montanha russa sem atrito, conforme a figura abaixo.

(a) Qual energia o carrinho tem no ponto A? Determine o seu valor em joules.

A energia que o carrinho tem no ponto A é a energia potencial gravitacional. Seu valor vale:

$$\begin{aligned}
 E_{PG} &= m \, g \, h \\
 &= 500 \times 10 \times 5 \\
 &= 25 \, 000 \, J
 \end{aligned}$$

(b) Qual energia o carrinho tem no ponto B? Determine o valor da velocidade do carrinho nesse ponto.

A energia que o carrinho tem no ponto B é a energia cinética, apenas. Como a energia mecânica se conserva ao longo do percurso, podemos escrever que:

$$\begin{aligned}E_A &= E_B \\m g h_A &= \frac{m v_B^2}{2} \\v_B^2 &= 2 g h \\v_B &= \sqrt{2 \times 10 \times 5} \\v_B &= 10 \text{ m/s}\end{aligned}$$

(c) O carrinho consegue atingir o ponto D? Justifique.

Sim. Pois como não há atrito, o sistema é conservativo: a energia mecânica ($E_M = E_P + E_C$) se conserva. Inicialmente, no ponto A, o carrinho tem uma energia total de $25000J$, o que é suficiente para ele subir uma altura igual ($h = 5m$) em qualquer ponto da trajetória.

(d) Imagine que no instante que o carrinho passa pelo ponto B, metade de sua massa é ejetada para fora por um sistema interno de mola. Essa massa sai com uma velocidade perpendicular ao movimento, não havendo, portanto, variação na velocidade do carrinho. Explique o que acontece com o carrinho e o seu movimento após essa liberação de massa.

Se o sistema 'joga' uma quantidade de massa fora, o carrinho fica mais leve e, portanto, nesse instante que ele passa pelo ponto B, sua energia cinética é reduzida. Consequentemente, a energia mecânica total do sistema diminui.

Para uma ejeção de $250kg$ (metade da massa), a energia cinética se reduz a

$$E'_C = m' \frac{v_B^2}{2},$$

onde $m' = \frac{1}{2} m$. Por isso, a energia passa a ser metade do valor inicial: $12500J$. Com esse valor, o carrinho não consegue mais atingir o ponto D e sobe uma altura $h' = \frac{1}{2} h = 2,5 m$. Assim, com metade da energia, o carrinho fica 'preso' na descida da montanha russa, oscilando entre os pontos X e X' , representados na figura abaixo.

Ativ. 2B e Gabarito - Estados excitados

O cálculo que apresentamos para a energia total do átomo de hidrogênio é um modelo baseado na física clássica e corresponde a uma aproximação que pode ser usada **apenas** para o estado fundamental.

Niels Bohr (✱ 1885 - † 1962)

As configurações do átomo de hidrogênio com energias maiores do que a do estado fundamental correspondem aos estados excitados. As energias dos estados excitados do átomo podem ser medidas experimentalmente através das raia espectrais. Os resultados dessas medidas puderam ser sistematizados na expressão da mecânica quântica

$$E_n = -\frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)}$$

onde $n = 1, 2, 3, \dots$ é um número inteiro que indica qual é o estado.

(1) Determine o valor da energia E_n para outros estados e represente esses níveis de energia no gráfico ao lado.

$$n = 1, E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

$$n = 2, E_2 = -3,4 \text{ eV}$$

$$n = 3, E_3 = -1,51 \text{ eV}$$

$$n = 4, E_4 = -0,85 \text{ eV}$$

(2) Um átomo de hidrogênio sofre um processo no qual seu estado energético é alterado. Para os dois exemplos abaixo, (i) represente no gráfico ao lado o processo citado, (ii) calcule a energia emitida ou absorvida pelo sistema e (iii) complete a frase.

(a) transição do estado fundamental para o 2º estado excitado

Energia envolvida na transição

eq. conservação de energia

$$E_{\text{final}} = E_{\text{inicial}} + E'$$

$$-1,51 = -13,6 + E'$$

$$E' = +12,09 \text{ eV}$$

(positiva : Emitida)

Nesse processo, o sistema **perdeu** energia.
(ganhou / perdeu)

Portanto, ele se caracteriza como uma reação **exotérmica**.
(exotérmica / endotérmica)

(b) transição do 3º estado excitado para o 1º estado excitado

Energia envolvida na transição

eq. conservação de energia

$$E_{\text{final}} = E_{\text{inicial}} + E'$$

$$-3,4 = -0,85 + E'$$

$$E' = -2,55 \text{ eV}$$

(negativa : $E_{\text{absorvida}}$)

Nesse processo, o sistema **ganhou** energia.
(ganhou / perdeu)

Portanto, ele se caracteriza como uma reação **endotérmica**.
(exotérmica / endotérmica)

(3) Assim como nos processos de transição de estado citados no exercício anterior, para se 'montar' um átomo de hidrogênio, ou seja, juntar duas partes: um próton e um elétron, também é necessário alterar a energia do sistema. A figura abaixo ilustra esse processo.

(a) Represente a construção do átomo de hidrogênio no gráfico de energia abaixo e calcule a energia, dizendo se ela é *absorvida* ou *emitida*, pelo sistema.

(b) Escreva uma história narrando esse processo, envolvendo todos os elementos: próton, elétron, tempo, espaço, energias, velocidade, etc...

No instante t_1 existia um elétron livre com velocidade v_0 , tal que sua energia cinética era de 10eV. Ao se aproximar de um próton, com carga oposta, sente fortemente uma atração por ele e, no instante t_2 , através de um processo exotérmico emite um fóton com uma energia de 23,6eV. Depois dessa emissão, no instante t_3 , o elétron já perdeu parte da sua energia e tendo sido capturado pelo próton, fica preso a ele, orbitando à sua volta. O sistema passou a ser um átomo de hidrogênio com uma energia de -13,6eV.

Ativ. 2C e Gabarito - Sistema mecânico x Átomo de hidrogênio

Retomando o problema da montanha russa de energia mecânica apresentado no início da atividade de hoje, no item (d) foi solicitada uma explicação do que acontecia com o carrinho se ele ejetasse parte de sua massa ao passar pelo ponto B da trajetória.

Após esse problema, abordamos o tema **sistemas ligados** na perspectiva de gráficos de energia (poço de potencial) e tratamos especificamente o caso do átomo de hidrogênio.

Re-explique a situação do item (d) da 1ª atividade usando os conceitos apresentados na aula de hoje, fazendo um paralelo com *poço de potencial*, *níveis de energia*, *átomo de hidrogênio*, *reação exotérmica* ou *endotérmica*, etc...

A situação apresentada da montanha russa é análoga ao átomo de hidrogênio. Inicialmente, o carrinho possui uma determinada energia total ($25000J$) e partia de um ponto A de uma altura de 5 metros. Com essa energia, o carrinho estava livre e podia atravessar o ponto D, com mesma altura. Ao ejetar parte de sua massa, sua energia mecânica total é reduzida e, portanto, ele não consegue mais chegar ao ponto D e passa a ficar 'preso' dentro da montanha russa, ou seja, ele não atravessa mais a barreira e vira um sistema ligado. Fazendo um paralelo com a construção de um átomo, um elétron é livre quando tem uma energia positiva e para ele ficar 'preso' ao próton e virar um sistema ligado chamado átomo, ele deve 'perder' energia, através de uma reação exotérmica, e o sistema se reduz a $-13,6\text{ eV}$ (se for no estado fundamental). A ejeção de massa do carrinho é também uma reação exotérmica, análoga à emissão de um fóton.

Aula 3 - Energia e Momento no Eletromagnetismo

Objetivo

O objetivo dessa atividade é discutir como a **energia** é vista no eletromagnetismo. Na atividade passada vimos sistemas ligados e átomo de hidrogênio do ponto de vista dos gráficos de energia. Agora, nessa atividade, a energia é abordada sob o enfoque dos campos elétrico e magnético. No eletromagnetismo, os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ tem papéis centrais e a energia eletromagnética está associada a eles. Toda região do espaço onde esses campos existirem, tem energia eletromagnética. A discussão inicial é feita com campos estáticos, por exemplo, em um capacitor e, a seguir, com campos em movimento, nas **ondas eletromagnéticas**. O objetivo principal é chegar na ideia que onda carrega energia e momento pois, com isso, estamos atribuindo a propriedade do momento e energia a algo sem massa e, portanto, desconstruindo as características da matéria newtoniana.

Conteúdo Físico

Densidade de energia eletromagnética. Energia de um capacitor. Energia de duas cargas pontiformes. Energia de um solenóide. Ondas eletromagnéticas. Vetor de Poynting.

Pré-requisitos

Campo elétrico de uma carga pontiforme. Trabalho da força elétrica. Força de Lorentz. Lei de Gauss. Campo magnético de um fio retilíneo e solenóide.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio ao professor - aula 3 (apêndice)
- Instrução para montagem do kit 'ondas eletromagnéticas' (p/ o professor)
- Roteiro para a Atividade 3A (p/ o aluno)
- Roteiro para a Atividade Extraclasse (lição de casa)
- Gabarito da Atividade 3A

Obs.: A Atividade Extraclasse não possui gabarito pois trata de questões pessoais que os alunos deverão refletir.

Momentos Sugeridos

Essa atividade deve ser dividida em três momentos, com duas dinâmicas diferentes, uma com a atuação do professor e outra com o trabalho dos alunos. Na primeira dinâmica com a atuação do professor, de aproximadamente uma hora, haverá exposição do tema pelo professor e a segunda dinâmica, com participação dos alunos, de aproximadamente 45 minutos, haverá o trabalho em grupo dos alunos. O quadro abaixo resume essa divisão e mostra a ordem dos momentos. Em seguida, temos as instruções de cada momento.

professor	60 min	1º Momento Prof.
aluno	45 min	1º Momento aluno - Ativ. 3A
professor	15 min	2º Momento Prof.

• **1º Momento Prof.:** aproximadamente 60 min

O professor deve iniciar essa atividade fazendo uma discussão sobre a energia do campo elétrico e magnético. Todo o enfoque dessa atividade é dentro do eletromagnetismo. Deve ser usada a expressão geral da densidade de energia $\frac{dU}{dV} = \frac{\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0}$. O caso mais concreto e conhecido dos alunos é o **capacitor**, por isso, esse exemplo deve ser usado. Com essa expressão da densidade de energia é possível mostrar a energia armazenada dentro do capacitor. Após essa demonstração, o professor deve fazer uma discussão epistemológica, aprofundando os aspectos da expressão matemática e, principalmente, perguntando: "aonde está essa energia?" Em seguida ao capacitor, deve ser dado o exemplo da energia de duas cargas puntiformes pois, embora todos saibam que a energia potencial entre elas vale $U = k_0 \frac{Qq}{r}$, a expressão $\frac{dU}{dV}$ permite discutir a **auto-energia** das duas cargas que existe no espaço e o seu significado físico. Toda essa discussão da **energia do campo** é para poder entrar em **ondas eletromagnéticas**. Se onde tem campo tem energia, a onda carrega energia. O professor deve dar uma noção geral de ondas eletromagnéticas para prepará-los para a atividade 3A. Toda essa discussão está no texto de apoio ao professor - aula 3, anexado no apêndice.

• **1º Momento aluno:** aproximadamente 45 min

Após a exposição do professor, ele deverá distribuir o roteiro para a atividade 3A que será feita em grupo. O objetivo principal dessa atividade é a visualização de uma onda eletromagnética no espaço tridimensional. Para isso, os alunos deverão usar o kit fornecido a eles e montar uma onda, representando corretamente os vetores $\vec{E}$, $\vec{B}$ e $\vec{v}$. O professor deve sentir a dificuldade dos alunos e auxiliá-los caso seja necessário. Após a montagem, deve acontecer uma discussão coletiva, conduzida pelo professor para que chegue exatamente no ponto principal, que será abordado no momento a seguir.

• **2º Momento Prof.:** aproximadamente 15 min

Após a atividade 3A, que teve como objetivo: (i) a visualização dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ de um onda eletromagnética, (ii) o entendimento do vetor de Poynting, (iii) a oscilação dos campos (eles são descritos por uma função seno) e, principalmente, (iv) como a energia da onda está distribuída no espaço, o professor deve fazer um fechamento da aula, discutindo a **transferência de momento** de

uma onda num caso concreto: onda incidindo em um espelho. Essa discussão escancara o fato das ondas eletromagnéticas carregarem momento e começa a desconstruir a massa da física newtoniana. Obs.: Essa discussão é super importante ser no final para que todos os alunos vão embora com essa sensação de "como assim, momento de uma onda, se ela não tem massa?". Na aula seguinte, após uma semana, a 3ª lei de Newton é 'quebrada' no caso da radiação.

Instruções para montagem do kit 'ondas eletromagnéticas'

Desenho da senóide

Kit para a montagem

- cano PVC - $\frac{3}{4}$ polegadas de diâmetro

tamanho: $32\text{cm} \times 4 = 128\text{cm}$ (+ 2 bordas, 10 cm cada) = 148cm

- varetas de madeira - 58 varetas redondas (8mm de diâmetro)

tamanhos: 4 máximos ($\times 2$) $\rightarrow$ 8 máximos

8 médios (+) ($\times 2$) $\rightarrow$ 16 médios

8 médios (-) ($\times 2$) $\rightarrow$ 16 médios

8 pequenos ($\times 2$) $\rightarrow$ 16 pequenos

2 qualquer comprimento

- 1 placa de madeira furada (placa 1)
- 1 placa de madeira (placa 2)

Descrição da montagem

• Cano de PVC

- o cano deve ter 1,5 metros de comprimento
- os furos devem estar espaçados de 4cm
- cada meia senóide tem 8 furos, portanto, o cano inteiro deverá ter 32 furos
- deixar 10cm nas bordas, ou seja, o 1º furo começa a partir de 10cm do cano

Detalhes que podem ajudar na construção:

- lixar as bordas do cano para elas ficarem lisas
- fazer as marcações no cano antes de furar. Usar uma cantoneira de metal, fixar o cano e girar 90° para fazer as marcações perpendiculares.
- medir o diâmetro do palito para escolher a broca certa, antes de fazer o furo. Testar com apenas um furo.
- veja na figura: atenção!! Como as varetas do campo elétrico atrapalham as varetas do campo magnético, sugerimos que os furos laterais sejam deslocados de 8mm (que corresponde ao diâmetro da vareta).

• Varetas

- para um kit, são necessários 58 varetas, cujas características estão descritas na tabela abaixo.
- as varetas vermelhas são para representar a *velocidade* e o *vetor de Poynting*, por isso, não tem um tamanho específico.
- a medida sugerida para a altura máxima da vareta é $A = 24\text{cm}$.

ângulo (°)	ângulo (rad)	sen
22,5	$\pi/8 = 0,393$	0,383
45	$\pi/4 = 0,785$	0,707
67,5	$3\pi/8 = 1,178$	0,924
90	$\pi/2 = 1,571$	1

cor	varetas	quantidade	tamanho	para $A = 24\text{cm}$
azul	grande	4	$A \text{ sen}90^0$	$24 \times 1 = 24 \text{ cm}$
azul	médio +	8	$A \text{ sen}67,5^0$	$24 \times 0,924 = 21,2 \text{ cm}$
azul	médio -	8	$A \text{ sen}45^0$	$24 \times 0,707 = 16,97 \text{ cm}$
azul	pequeno	8	$A \text{ sen}22,5^0$	$24 \times 0,383 = 9,19 \text{ cm}$
verde	grande	4	$A \text{ sen}90^0$	$24 \times 1 = 24 \text{ cm}$
verde	médio +	8	$A \text{ sen}67,5^0$	$24 \times 0,924 = 21,2 \text{ cm}$
verde	médio -	8	$A \text{ sen}45^0$	$24 \times 0,707 = 16,97 \text{ cm}$
verde	pequeno	8	$A \text{ sen}22,5^0$	$24 \times 0,383 = 9,19 \text{ cm}$
vermelho	qq tamanho	2	qq tamanho	10 cm
		total: 58		

Observ.: A senóide pode ser feita com alturas menores e, para isso, basta multiplicar o altura máxima pelos senos dos ângulos, conforme indica a tabela. Para que a vareta fique firme ao encaixá-la no cano, sugerimos que ela seja presa nos dois furos, por isso, recomendamos que o comprimento total das varetas seja acrescentado 2,7cm (diâmetro do cano).

Detalhes que podem ajudar na construção:

(a) ao pintar o palito, pensar no pedaço que vai ficar dentro do cano. Ou seja, não pintar o palito inteiro e deixar a parte sem pintar (com a madeira) num tamanho suficiente para entrar no furo. Essa distância é os 2,7 cm citados na observação acima.

(b) cortar as varetas nos outros três comprimentos (21,2cm ; 16,97cm e 9,19cm) antes de pintá-las. Sugerimos também que as pontas sejam lixadas para facilitar o encaixe nos furos.

• Placas

Placa 1: essa placa serve para apoiar todos os raios de onda de todos os grupo. Depois que todos estiverem montados, o professor, juntamente com os alunos, deve encaixar cada raio em um furo da placa. Essa placa deve ter furos distribuídos uniformemente na sua área, em um número suficiente para que cada grupo encaixe seu raio de onda. Sugerimos que a placa seja de madeira dura (compensando, por exemplo) e que os furos sejam feitos com o diâmetro 1 ou 2 mm maior que o do cano de PVC.

Placa 2: essa placa pode ser lisa, de qualquer material e deve ser dura também. Ela será usada no final da atividade para a discussão coletiva da sala sobre a energia da onda e para responder às questões finais do roteiro entregue aos alunos. Essa placa tem a função de 'simular' uma frente de onda, já que a onda é plana. Mudando a placa de posição, fica fácil de conservar que no plano da placa, os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ tem o mesmo módulo, ou seja, o tamanho das flechas é igual.

- Kit montado

Comentário Final

Esse material serve para montar apenas 1 kit. Sugerimos que um kit seja entregue para cada grupo de 3 ou 4 alunos. Então, para uma sala com 40 alunos, o professor deverá fazer no mínimo 10 kits iguais a esse.

Sugerimos, também, que todos os palitos sejam colocados numa caixa e separados por tamanho e cor.

Ativ. 3A e Gabarito - Ondas Eletromagnéticas e a Energia

O grupo está recebendo um kit para montar uma onda eletromagnética. Esse kit contém:

- um cano longo (representando um raio de onda)
- flechas coloridas de vários tamanhos (representando os vetores)

Siga o roteiro abaixo para cumprir essa atividade.

1º) Com os elementos do kit, faça uma montagem do raio de uma onda eletromagnética, com os vetores $\vec{E}$, $\vec{B}$ e $\vec{v}$.

2º) Quando todos os grupos da sala tiverem montado o seu raio de onda, junte todos os raios de todos os grupos e monte uma onda eletromagnética plana.

3º) Discuta com todos os colegas da sala, respondendo as questões:

(a) Onde está a energia dessa onda?

A energia eletromagnética está nos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$, portanto, em todo o espaço aonde a onda eletromagnética estiver.

(b) Como a energia está distribuída no espaço?

A energia está distribuída em todo o espaço, e sua intensidade depende dos vetores $\vec{E}$ e $\vec{B}$. Nos pontos onde os módulos de $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são máximos, a densidade de energia também é. Como as intensidades dos campos dependem do ponto que consideramos, ou seja, é diferente em cada ponto do eixo y , a energia não está distribuída uniformemente e é maior nos máximos da função seno.

(c) Qual o significado físico do vetor de Poynting? Represente o vetor de Poynting $\vec{S}$ na montagem e escreva algumas de suas características vetoriais.

O vetor de Poynting representa a intensidade da energia que atravessa uma determinada superfície por unidade de tempo. Seu cálculo é feito através da expressão $\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$. Sua direção e sentido é o mesmo da velocidade da onda, ou seja, é perpendicular aos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$.

(d) Discuta com os colegas e mostre quais são os pontos do espaço onde $S = 0$.

O vetor de Poynting é igual a zero nos pontos aonde os campos também são, ou seja, nos 'zeros' da função seno.

(e) Se colocássemos uma placa perpendicular ao raio de onda, como ela sentiria a energia ao longo do tempo?

Sendo a placa plana, ela representa uma frente de onda, por isso, a intensidade dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ em cima da placa são iguais, ou seja, todas as flechas/vetores tem o mesmo tamanho. Como uma onda se desloca no eixo y , a cada instante que passa, as intensidades dos campos sobre a placa variam, aumentando e diminuindo de acordo com a função seno. Isso significa que, a energia (que está nos campos) que 'bate' na placa não o faz de maneira contínua. A energia que atravessa a placa, representada pelo vetor de Poynting, também tem máximos e mínimos e em determinados instantes, ela pode ser zero. Esse fluxo de energia, portanto, não é contínuo e acontece como 'soquinhos' separados pelos 'zeros' da função.

Roteiro da Ativ. 3 - Casa

Nome: _____ data: ____ / ____ / ____

Na atividade de hoje mostramos como é a energia no contexto do eletromagnetismo e que ela está associada os campos $\vec{E}^2$ e $\vec{B}^2$. Para uma onda eletromagnética que se desloca no espaço, os

campos carregam energia. Além disso, no final da atividade mostramos também que **onda transfere quantidade de movimento** ao bater em uma superfície. Sobre a atividade de hoje, responda as questões que se seguem. Por favor, solicitamos que ninguém seja consultado, apenas você mesmo! Busque as respostas dentro de você.

(a) Por que você acha que esse tema de hoje foi inserido nesse curso? Qual a conexão que pode ser feita com as aulas anteriores? O que você acha que iremos tratar na próxima semana?

(b) Concentre sua atenção nos conceitos de massa, energia, momento, inércia e campo eletromagnético. Usando (i) o mapa que você mesmo fez dos conceitos da mecânica e (ii) as anotações da aula de hoje do eletromagnetismo, **reflita** sobre possíveis conexões, rupturas, crises, semelhanças, ligações,...entre a mecânica e o eletromagnetismo.

Escreva abaixo o resultado dessa reflexão. (Se solte! Vale tudo, até discorrer sobre emoções epistemológicas, psicológicas, intelectuais,... Use o verso da folha, se precisar.)

Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação

Objetivo

O objetivo principal dessa aula é mostrar a origem da radiação eletromagnética e que ela carrega momento. Embora no final da atividade anterior já tenha sido dito que *onda carrega momento*, acreditamos que essa informação ainda não fez razão para a maioria dos alunos e não integrou, do ponto de vista cognitivo, à estrutura conceitual de cada um deles. Nessa atividade, mostramos que a desaceleração de uma carga elétrica promove uma alteração nas linhas de campo elétrico, uma deformação. Essa deformação percorre o espaço, à velocidade da luz, através de uma bolha de informação. Ou seja, a informação não é transmitida instantaneamente e existe um 'atraso' da deformação das linhas. Esse conceito é fundamental e está relacionado com a **inércia do campo**. O professor deve mostrar que **o campo tem inércia!** Além disso, nesse exemplo da radiação eletromagnética, deve ser mostrado que a 3ª lei de Newton não vale. Esse é o ponto principal da atividade 4: **desconstruir o universo newtoniano** e mostrar que nesse problema do eletromagnetismo a 3ª lei de Newton não vale mais e que a relatividade restrita **nasce** dentro do eletromagnetismo. Outro aspecto fundamental nessa atividade é enfatizar que mais importante que o princípio da ação e reação é o de conservação de momento e que, ele deve se manter. Para que isso aconteça, necessariamente, a radiação criada nesse problema deve carregar momento.

Conteúdo Físico

Linhas de campo elétrico. Carga em movimento uniforme. Carga em movimento acelerado. Origem da radiação eletromagnética. Deformação das linhas de campo. 3ª lei de Newton aplicada à eletrostática.

Pré-requisitos

Campo elétrico coulombiano. Força de Coulomb.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio ao professor - aula 4 (apêndice)
- Roteiro para a Atividade 4A

- Simulador das linhas de campo para movimento de carga: software *Radiation2D*

Momentos Sugeridos

Essa aula deve ser dividida em três momentos, com duas dinâmicas diferentes, uma com a atuação do professor e outra com o trabalho dos alunos. Na primeira dinâmica com a atuação do professor, de aproximadamente uma hora, haverá exposição do tema pelo professor e a segunda dinâmica, com participação dos alunos, de aproximadamente 30 minutos, haverá a atividade 4A em que eles irão responder algumas questões relacionadas ao tema e que conduzem para a discussão final que será feita pelo professor. O quadro abaixo resume essa divisão e mostra a ordem dos momentos. Em seguida, temos as instruções de cada momento.

professor	60 min	1º Momento Prof.
aluno	30 min	1º Momento aluno - Ativ. 4A
professor	30 min	2º Momento Prof.

- **1º Momento Prof.:** aproximadamente 60 min

O professor deve iniciar essa aula fazendo uma discussão de como são as linhas de campo elétrico de uma carga em 3 situações: carga parada, carga em movimento uniforme e carga acelerada. No caso da carga acelerada, deve ser feito o desenho do espaço ao redor da carga no instante que ela bate em um obstáculo. Como o desenho é complicado, pedimos que ele seja feito passo-a-passo e que os alunos façam **junto**, copiando em seus cadernos. Após esse desenho, o professor deve mostrar o simulador de linhas de campos *Radiation 2D* para diferentes situações, comprovando o seu desenho. Essa discussão serve para prepará-los para a atividade 4A que será distribuída a seguir. Toda essa discussão está no texto de apoio ao professor - aula 4, anexado no apêndice.

- **1º Momento aluno:** aproximadamente 30 min

Após a exposição do professor, ele deverá distribuir o roteiro para a atividade 4A que será feita individualmente. O objetivo principal dessa atividade é conduzir os alunos à problemática que irá trazer a desconstrução do universo newtoniano e a quebra da 3ª lei de Newton. Após eles responderem essas questões, estarão no ponto principal para, a seguir, entrar o professor no próximo momento.

- **2º Momento Prof.:** aproximadamente 30 min

Após a atividade 4A, que teve como objetivo mostrar que a 3ª lei de Newton não vale para o caso da radiação (uau!), acreditamos que os alunos fiquem completamente desconcertados. Se isso acontecer, ótimo! Pois nesse momento final o professor entra com os questionamentos e conduz a sala inteira à solução da inquietação gerada com a atividade. Nessa parte final, o professor deve fazer três discussões importantes: (i) mostrar que a 3ª lei de Newton não é tão fundamental assim e que ela só 'servia' para o princípio mais fundamental que é a conservação da quantidade de movimento; (ii) mostrar que a solução para esse problema é considerar que a **onda carrega momento** e (iii) mostrar que essas questões foram a raiz da relatividade e que Einstein se motivou em problemas do eletromagnetismo para pensar na sua teoria.

Ativ. 4A e Gabarito - Radiações e a 3ª Lei de Newton

1) A interação entre duas cargas acontece através pela força coulombiana. A lei de Coulomb afirma que a força de origem elétrica entre duas cargas puntiformes q_1 e q_2 , em repouso no vácuo, tem as seguintes características:

- direção: a da reta que une as cargas
- sentido: repulsão para cargas de mesmo sinal e atração para cargas de sinais opostos
- módulo: dado, no S.I., pela expressão:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} q_1 q_2 \frac{1}{r^2} ,$$

onde r é a distância relativa.

Essa força é uma força de Interação entre duas partículas; assim, existe uma força devida a q_2 agindo em q_1 e outra força, de sentido oposto e devida a q_1 agindo em q_2 .

3ª lei de Newton

Duas cargas puntiformes paradas de sinais **contrários** estão próximas uma da outra, conforme a figura abaixo.

- Desenhe as linhas do campo elétrico das duas cargas, na figura acima.
- Represente as forças elétricas (par ação-reação) nas duas cargas, na figura acima.

(c) Escreva a expressão dessas forças em função dos campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$. O que se pode afirmar sobre a direção, sentido e módulo dessas forças?

Neste exemplo a força $\vec{F}_1$ é exercida pela carga q_2 e sentida pela carga q_1 . Analogamente, a força $\vec{F}_2$ é sentida pela carga q_2 e causada pela carga q_1 . Os módulos das duas forças são **iguais**: $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|$. Podemos escrever a força elétrica $\vec{F}_2$, que atua na carga q_2 , como sendo $\vec{F}_2 = q_2 \vec{E}_1$, e o mesmo podemos escrever para a carga q_1 . Ou seja, sobre ela age uma força $\vec{F}_1$, proporcional ao campo $\vec{E}_2$ da carga q_2 no ponto P_1 , que é dada por $\vec{F}_1 = q_1 \vec{E}_2$.

As duas expressões de igualdade da força indicadas acima mostram uma relação muito importante de *paralelismo* entre a força e o campo. Podemos escrever que $\vec{F}_2 \parallel \vec{E}_1$ e $\vec{F}_1 \parallel \vec{E}_2$. Dessa relação de paralelismo entre a força e o campo, como os campos também são paralelos entre si, podemos afirmar que as forças também são paralelas entre si: $\vec{F}_2 \parallel \vec{F}_1$. Essa é uma consequência muito importante do paralelismo entre força e campo que evidencia o fato das forças mútuas entre duas cargas puntiformes constituírem um **par ação e reação**.

2) Na exposição do professor de hoje, você viu que em um processo de aceleração de uma carga, as linhas de campo no espaço à sua volta se deformam. Na figura abaixo, temos uma 'foto' que representa essa deformação. Supondo que a carga q_1 seja **positiva**,

(a) Indique com flechas na figura acima, o sentido das linhas de campo.

(b) Existe alguma diferença entre a situação física acima e a apresentação pelo professor durante a aula? Justifique.

Sim. A situação mostrada em sala pelo professor é de uma carga em movimento uniforme que sofre uma desaceleração, ou seja, ela pára em um obstáculo. Por isso, as linhas de campo na região que não foi informada que a carga parou apontam para onde a carga deveria estar que é à frente de q_1 . Na figura mostrada acima, as linhas apontam para trás de q_1 . Esse ponto é aonde ela deveria estar. Portanto, ela

estava parada e sofreu uma aceleração (que é o exemplo contrário ao da desaceleração).

(c) Suponha que uma outra carga q_2 , também positiva, seja colocada em repouso no ponto P . Desenhe as linhas de campo elétrico dessa carga, na figura abaixo.

(d) Agora, com os dois campos no desenho acima (o da carga q_1 e o da carga q_2), represente com flechas a força elétrica que q_1 faz em q_2 e que q_2 faz em q_1 .

(e) Que conclusão podemos tirar a respeito da 3ª lei de Newton?

A 3ª lei de Newton não vale para esse caso. Claramente as direções das forças são diferentes.

Aula 5 - Relatividade: absolutos e relativos

Objetivo

O objetivo principal dessa aula é mostrar as grandezas invariantes na relatividade restrita. Tanto na relatividade por rotações quanto na relatividade restrita existem grandezas relativas ao observador e grandezas absolutas. Nessa atividade essa ideia é construída calmamente, partindo da relatividade espacial (geométrica) até chegar na relatividade de Einstein. Aos poucos, devem ser apresentados os absolutos da RR: módulo da velocidade da luz, eventos, intervalo e tempo próprio. Essa aula é uma preparação para o conceito de quadrimomento e massa invariante.

Conteúdo Físico

Relatividade por rotações (espacial). Relatividade restrita: absolutos e relativos, princípios, transformações de Lorentz, produto escalar num espaço quadridimensional, intervalo relativístico e tempo próprio.

Pré-requisitos

Coordenadas cartesianas. Coordenadas esféricas. Transformações de Galileu e de Lorentz.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio ao professor - aula 5 (apêndice)
- Roteiro para a Atividade 5 - Casa

Momentos Sugeridos

Essa aula, do ponto de vista conceitual, é bastante complexa. O professor deve passar por vários tópicos da relatividade restrita até chegar na noção de **intervalo relativístico**. Porém, sugerimos que muitos itens sejam falados antes, para transferir aos alunos a noção de invariantes (absolutos) e relativos. Dado o volume de assuntos, essa atividade será feita integralmente pelo professor, que conduzirá a exposição e discussão com os alunos.

- **Momento Prof.:** aproximadamente 120 min

O professor deve abordar nessa atividade vários tópicos de maneira suave e conduzindo a discussão com os alunos. A sequência proposta é intencional e o principal objetivo dessa atividade é

mostrar que existe **grandezas absolutas** na relatividade restrita que não dependem do referencial. Esse 'caminho' de mostrar os absolutos, através do **produto escalar** de um quadri vetor, irá preparar para a aula seguinte: quadrimomento e massa invariante. Toda essa discussão está no texto de apoio ao professor - aula 5, anexado no apêndice.

Ativ. 5 - Casa e Gabarito

Uma *teoria de relatividade* é uma teoria que identifica e relaciona grandezas absolutas e relativas. Essas grandezas estão presentes em várias partes da física, da matemática e da nossa vida cotidiana. Distinguir absolutos de relativos não é uma tarefa fácil pois envolve operações matemáticas, mentais e diferentes observadores.

Na aula de hoje abordamos duas teorias de relatividade: a **por rotações**, também chamada de geométrica ou espacial e a **restrita**, proposta por Einstein e aplicada à física. Nas duas relatividades existem grandezas que independem do referencial adotado e, por isso, são chamadas de **invariantes**.

Parte I - Relatividade por rotações em 2 Dimensões

Um vetor $\vec{A}$ em geometria pode ser descrito no plano cartesiano com as coordenadas x e y . Considerando r o módulo do vetor da figura abaixo, complete o espaço com o que se pede.

(a) Escreva as componentes do vetor $\vec{A}$ em função de r e θ .

$$x = r \cos \theta \quad \hat{i}$$

$$y = r \sin \theta \quad \hat{j}$$

$$\vec{A} = r \cos \theta \quad \hat{i} + r \sin \theta \quad \hat{j}$$

$$\vec{A} = (r \cos \theta , r \sin \theta)$$

(b) Sabendo que o módulo de um vetor é dado por $\sqrt{x^2 + y^2}$, usando as componentes do item anterior, determine o módulo de $\vec{A}$. Esse módulo depende de θ ? O que isso significa?

$$|\vec{A}| = \sqrt{r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta} = \sqrt{r^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}$$

$$|\vec{A}| = \sqrt{r^2}$$

$$|\vec{A}| = r$$

O módulo de um vetor não depende de θ , ou seja, não depende do sistema de coordenadas. Qualquer que seja o ângulo entre o vetor e o eixo x , o resultado será o mesmo.

(c) O mesmo vetor $\vec{A}$ pode ser descrito em outro sistema de coordenadas. Supondo que os eixos $x'y'$ sejam rodados de um ângulo α em relação aos eixos xy , escreva as componentes do vetor nesse novo referencial.

$$x' = r \cos \varphi \quad \hat{i}' \quad \varphi = \theta - \alpha$$

$$y' = r \sin \varphi \quad \hat{j}'$$

$$\vec{A} = r \cos \varphi \hat{i}' + r \sin \varphi \hat{j}'$$

$$\vec{A} = (r \cos \varphi , r \sin \varphi)$$

(d) Usando as coordenadas x' e y' obtidas no item (c), determine o módulo do vetor $\vec{A}$, que é dado por $|\vec{A}| = \sqrt{x'^2 + y'^2}$.

$$|\vec{A}| = \sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi} = \sqrt{r^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}$$

$$|\vec{A}| = \sqrt{r^2}$$

$$|\vec{A}| = r$$

(e) Compare o módulo de $\vec{A}$ obtido nos dois sistemas de eixos: xy e $x'y'$. Que conclusão podemos tirar sobre o módulo de um vetor? Ele é uma grandeza relativa ou absoluta?

O módulo do vetor $\vec{A}$ é igual nos dois sistemas de coordenadas. Isso significa que ele independe do referencial, portanto, é uma grandeza absoluta.

(f) Uma teoria de relatividade permite **transformar** as coordenadas de um referencial para o outro. No exercício feito, essa transformação consiste em obter as coordenadas x' e y' , conhecendo-se as coordenadas x e y e o ângulo de rotação α .

Usando as relações:

$$\cos(a - b) = \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b$$

$$\sin(a - b) = \sin a \cdot \cos b - \sin b \cdot \cos a \quad ,$$

podemos escrever os resultados obtidos como:

$$x = r \cos\theta$$

$$y = r \sin\theta$$

$$x' = r [\cos\theta \cos\alpha + \sin\theta \sin\alpha]$$

$$y' = r [\sin\theta \cos\alpha - \sin\alpha \cos\theta]$$

Escreva as equações de transformação do sistema $xy \rightarrow x'y'$.

$$x' = \cos \alpha \ x + \sin \alpha \ y$$

$$y' = -\sin \alpha \ x + \cos \alpha \ y$$

Essa transformação pode ser representada na forma **matricial**. Complete a matriz abaixo com a transformação obtida.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Parte II - Relatividade por rotações em 3 Dimensões

(1) Um vetor também pode ser tridimensional e para descrevê-lo, precisamos de um sistema com três eixos. Considere o vetor $\vec{a}$ da figura abaixo.

Considerando seu módulo igual a r , podemos descrevê-lo em função de r , θ e φ usando *coordenadas esféricas*:

$$x = r \sin\theta \cos\varphi$$

$$y = r \sin\theta \sin\varphi$$

$$z = r \cos\theta$$

Sabendo que o quadrado do módulo de $\vec{a}$ vale $|\vec{a}|^2 = x^2 + y^2 + z^2$, calcule o **módulo** do vetor e diga se este resultado depende do sistema de coordenadas. Justifique sua resposta.

$$\begin{aligned}
|\vec{r}|^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\
&= (r \operatorname{sen}\theta \cos\varphi)^2 + (r \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}\varphi)^2 + (r \cos\theta)^2 \\
&= r^2 \operatorname{sen}^2\theta (\cos^2\varphi + \operatorname{sen}^2\varphi) + r^2 \cos^2\theta \\
&= r^2
\end{aligned}$$

Podemos observar que o resultado acima não depende dos ângulos θ e φ . Assim, o módulo do vetor não depende do sistemas de coordenadas.

(2) Um objeto concreto, como um **cubo**, pode ser representado de várias maneiras. Na geometria analítica, o cubo é descrito por meio de expressões matemáticas e quantitativas, que dependem de referenciais. Por exemplo, no referencial de Maria, denotado por S^M e mostrado na figura abaixo, um cubo de aresta L pode ser descrito pelas coordenadas de seus vértices:

$P_1^M : (0, 0, 0)$	$P_2^M : (L, 0, 0)$
$P_3^M : (0, L, 0)$	$P_4^M : (0, 0, L)$
$P_5^M : (L, L, 0)$	$P_6^M : (L, 0, L)$
$P_7^M : (0, L, L)$	$P_8^M : (L, L, L)$

Nessa representação analítica, é necessário o uso de um referencial que incorpora, obrigatoriamente, um **ponto de vista externo** ao objeto representado (o cubo). Mudando o referencial, a descrição do cubo muda, ainda que o cubo não mude. No referencial de Ana, mostrado na figura abaixo, a garota que está deslocada em relação a Maria pelo vetor $(-a, -b, -c)$, vê o mesmo cubo. Porém, a **descrição dos mesmos vértices é diferente**.

Complete com as coordenadas dos vértices nos espaços abaixo, em função de a , b , c e L .

$$\begin{array}{ll}
 P_1^A : (a, b, c) & P_2^A : (a + L, b, c) \\
 P_3^A : (a, b + L, c) & P_4^A : (a, b, c + L) \\
 P_5^A : (a + L, b + L, c) & P_6^A : (a + L, b, c + L) \\
 P_7^A : (a, b + L, c + L) & P_8^A : (a + L, b + L, c + L)
 \end{array}$$

Se uma pessoa leiga em matemática visse esses dois conjuntos de coordenadas, o de Maria e o de Ana, pelo fato deles serem **diferentes**, provavelmente seria muito difícil para ela perceber que esses conjuntos descrevem **o mesmo cubo**. Por outro lado, no meio dessas descrições que dependem do referencial existem **invariantes** escondidos. Para achá-los, é necessário fazer alguma operação matemática com as coordenadas.

Um **invariante** do cubo é o **comprimento de uma diagonal**, que para os dois referenciais, tanto o de Maria quanto o de Ana, deve ser o mesmo. Vemos na figura do cubo que o comprimento de uma sua diagonal é a distância entre os dois pontos, por exemplo, P_2 e P_7 . Em geometria analítica, calcula-se a distância entre dois pontos como sendo:

$$d_{AB}^2 = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2$$

(i) Determine o comprimento dessa diagonal do cubo no referencial de Maria, usando a fórmula da distância entre os dois pontos P_2^M e P_7^M .

$$\begin{aligned}
P_7^M - P_2^M &= (x_7^M - x_2^M, y_7^M - y_2^M, z_7^M - z_2^M) \\
&= (0 - L, L - 0, L - 0) \\
&= (-L, L, L) \\
d_{72}^2 &= (-L)^2 + (L)^2 + (L)^2 \\
&= 3L^2 \\
&= L\sqrt{3}
\end{aligned}$$

(ii) Calcule a distância entre os pontos P_2^A e P_7^A , no referencial de Ana e diga se esse comprimento depende ou não do referencial e, portanto, se ele é uma grandeza **invariante**.

$$\begin{aligned}
P_7^A - P_2^A &= (x_7^A - x_2^A, y_7^A - y_2^A, z_7^A - z_2^A) \\
&= (a - a - L, b + L - b, c + L - c) \\
&= (-L, L, L) \\
d_{72}^2 &= (-L)^2 + (L)^2 + (L)^2 \\
&= 3L^2 \\
&= L\sqrt{3}
\end{aligned}$$

O comprimento da diagonal é igual nos dois referenciais! Portanto ele é uma grandeza invariante.

Parte III - Finalmente a Relatividade Restrita...

Einstein em seu artigo de 1905, intitulado *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, parte de um problema de eletromagnetismo para discutir a relatividade das grandezas físicas. Esse problema ficou conhecido como o problema do ímã e da espira e se trata de exemplo de indução eletromagnética.

(a) Considerando os dois referenciais da figura acima, o do imã (aonde Ana está) e o da espira (aonde Maria está), como cada uma delas descreve os movimentos do imã e da espira?

O movimento do imã e da espira é relativo. Para Ana, que está em cima do imã, a espira se aproxima com velocidade $\vec{v}$ para a direita e o imã está parado. Para Maria, que está em cima da espira, o imã se aproxima com velocidade $\vec{v}$ para a esquerda e a espira está parada.

(b) (Desafio!!) Sabendo que a força de Lorentz é expressa por $\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, suponha que você seja um **elétron** dentro do fio. Explique por quê você anda em cada referencial.

O aparecimento da corrente elétrica na espira ocorre nos dois referenciais, por isso, ele é algo absoluto. Isso significa que um elétron dentro do fio de fato se desloca. Porém, a descrição e a causa desse movimento não é igual para os dois referenciais.

No referencial de Ana:

O imã está parado e um elétron dentro da espira tem velocidade $\vec{v}$ para a direita. Ora, uma carga em movimento imersa em um campo magnético (o campo do imã) fica sujeita à força magnética dada pela expressão $\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B}$.

A força magnética será perpendicular à velocidade e, como ela é horizontal para a direita, essa força estará no plano da espira, tangente ao círculo. Com isso, o elétron se desloca circularmente dentro da espira, causando a corrente.

No referencial de Maria:

A espira está parada e, conseqüentemente, um elétron dentro dela também. Nesse referencial, o imã se desloca com velocidade $\vec{v}$ para a esquerda e, portanto, a intensidade do campo magnético em cima do

elétron é variável. De acordo com a lei de Faraday, variação de campo magnético cria um campo elétrico:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Com o aparecimento do campo elétrico, o elétron dentro do fio fica sujeito à força elétrica dada pela expressão $\vec{F}_E = q\vec{E}$.

Essa força é paralela ao campo $\vec{E}$. E o campo $\vec{E}$ é perpendicular à variação do campo $\vec{B}$. Assim, a força elétrica é também perpendicular ao plano da espira, causando um movimento desse elétron tangente ao círculo. Esse movimento dentro da espira corresponde à corrente elétrica.

Aula 6 - Relatividade: energia e massa

Objetivo

O objetivo principal dessa aula é mostrar que a massa é um invariante relativístico. Primeiramente, é necessário definir o quadrimomento na relatividade, usando o conceito de tempo próprio e depois, fazer o produto escalar desse quadrivetor. Além disso, deve ser deduzida a energia relativística para dois referenciais e mostrar que $E = mc^2$ apenas em um referencial onde uma partícula está em repouso. Para referenciais onde as partículas estão em movimento, sua energia é γmc^2 . O fato da massa ser invariante por referencial é o ponto principal da discussão, pois a maioria dos livros-texto dizem que a massa varia com a velocidade! Essa questão deve ser abordada e, tratada, na verdade, como um problema ontológico de entendimento do que é massa e do que é energia.

Conteúdo Físico

Redefinição do momento num espaço quadridimensional. Cálculo de p^2 . Energia relativística. Massa invariante.

Pré-requisitos

Transformações de Lorentz. Tempo próprio. Inércia e momento clássicos.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio ao professor - aula 6 (apêndice)
- Roteiro para a Atividade 6 - classe

Momentos Sugeridos

Essa aula, do ponto de vista conceitual, também é bastante complexa. O professor deve retomar os conceitos vistos na atividade anterior e chegar na *massa invariante*. A maior parte da atividade será conduzida pelo professor e os momentos da 'aula' serão divididos conforme mostramos a seguir.

professor	15 min	1º Momento Prof.
professor	60 min	2º Momento Prof.
aluno	30 min	1º Momento aluno - ativ. 6
professor	15 min	3º Momento professor

- 1º Momento Prof.: aproximadamente 15 min

Nesse primeiro momento da aula, após recolher a tarefa de casa dos alunos, o professor deverá comentar e discutir as questões dessa tarefa. Essa discussão inclui uma revisão e retomada dos conceitos de absolutos e relativos da relatividade restrita. A idéia principal é trazer os alunos para os pontos essenciais da relatividade restrita pois serão eles que farão a base para o entendimento da massa relativística. Como a tarefa de casa teve exercícios considerados técnicos, porém importantes, é necessário uma re-explicação, principalmente, do último exercício. O professor deve discutir com os alunos o problema da espira e do imã e, se possível, mostrar a lei de Faraday com o movimento do imã e da espira.

● **2º Momento Prof.:** aproximadamente 60 min

Nesse segundo momento, que deve durar aproximadamente uma hora, o professor deverá abordar a definição do quadrimomento na relatividade restrita, de maneira suave, e conduzindo a discussão com os alunos. O principal objetivo do quadrimomento é chegar na equação da energia relativística: $E = mc^2$, para uma referencial em que um corpo está em repouso e $E = \gamma mc^2$ para um referencial em que um corpo se movimenta. Essa sequência é intencional pois é a partir do produto escalar do quadrimomento p^2 é que se chega à **massa invariante**. Toda essa discussão está no texto de apoio ao professor - aula 6, anexado no apêndice.

● **1º Momento aluno:** aproximadamente 30 min

Após a exposição do professor, ele deverá distribuir o roteiro para a atividade 6 que será feita em sala individualmente ou em grupo. O objetivo principal dessa atividade é que os alunos reflitam sobre as grandezas conhecidas da mecânica e da relatividade, dizendo quais delas se tornaram conceitos invariantes por mudança de referencial.

● **3º Momento Prof.:** aproximadamente 15 min

O professor deve recolher a atividade 6 que os alunos acabaram de fazer e provocar uma discussão sobre ela. Acreditamos que essa atividade sintetiza as principais ideias apresentadas ao longo do curso e, por isso, uma discussão e retomada dessas ideias é fundamental para fechar a 'teoria' do curso. O professor deve conduzir uma discussão, com cunho epistemológico, para que os alunos percebam as mudanças entre os conceitos de massa e energia. Essas mudanças mostram a separação das propriedades da matéria da mecânica newtoniana (inércia e atratibilidade) da massa e a 'migração' delas para a energia. Esse deve ser o ponto alto da aula.

Ativ. 6 e Gabarito - Absolutos e relativos

(A) Os conceitos da relatividade que tratamos nesse curso estão listados abaixo. Coloque à frente de cada um deles 'absoluto' ou 'relativo', conforme a sua classificação.

velocidade - $\vec{v}$ - relativa

evento - E - [absoluto](#)

massa - M - [absoluta](#)

espaço-tempo - $(ct; x, y, z)$ - [relativo](#)

quadrimomento - p - [relativo](#)

energia - E - [relativa](#)

intervalo relativístico - e^2 - [absoluto](#)

tempo próprio - τ - [absoluto](#)

velocidade da luz - c - [absoluta](#)

Aula 7 - $E = mc^2$ em ação...

Objetivo

O objetivo dessa aula é apresentar as principais consequências da relatividade restrita e da fórmula $E = mc^2$ para o entendimento do mundo microscópico. Em escalas microscópicas, a conservação de massa de Lavousier não vale e a relatividade restrita regula o peso dos sistemas ligados. Quase tudo é formado por sistemas ligados, desde átomos até os nucleons e, a fórmula de Einstein é fundamental para entender a relação entre massa e energia desses sistemas. O intuito dessa atividade é mostrar o significado mais profunda da relação massa-energia e sua aplicação na física nuclear.

Conteúdo Físico

Reações exotérmicas. Energia de ligação. Fóton de luz. Combustão química. Átomo de Hidrogênio. Núcleos atômicos. Dêuteron. Gráfico das energias. O próton. Interação forte. Energias potencial e cinética.

Pré-requisitos

Equação de conservação da energia. Energia relativística. Gráfico de potencial. Átomo de Hidrogênio.

Recursos

- Material instrucional para o professor (este)
- Texto apoio ao professor - aula 7 (apêndice)
- Roteiro para a Atividade 7 - classe
- Roteiro para a Atividade 7 - casa

Momentos Sugeridos

Essa aula, do ponto de vista conceitual, também é bastante complexa e cheia de detalhes. Essa é a última atividade do curso e tem a função de reunir todos os conceitos vistos ao longo do curso. Essencialmente, a exposição do professor será a aplicação do $E = mc^2$ nos sistemas, partindo de exemplos macroscópicos, como a combustão, até chegar no interior do próton, para o caso dos quarks. Ao final, após mostrar o 'peso da energia', a principal discussão, de cunho epistemológico, será retomar o **conceito de massa** e resgatar as ideias da mecânica vista no início do curso. A atividade está dividida em dois momentos, um conduzido pelo professor e o outro com a participação dos alunos, através de uma atividade proposta. Os momentos estão descritos a seguir.

professor	60 min	1º Momento Prof.
aluno	30 min	1º Momento aluno - ativ. 7
professor	30 min	2º Momento Prof.

• **1º Momento Prof.:** aproximadamente 60 min

Nesse primeiro momento da aula, o professor deve apresentar o uso da equação $E = mc^2$ nas reações exotérmicas. Sempre dando exemplos concretos e existentes na natureza: reações de combustão, reação para montar um átomo (hidrogênio), dêuteron (núcleo mais simples) e por último o sistema próton, formado por três quarks. O principal objetivo dessa exposição é mostrar como a matéria é constituída. No caso do próton, 99% da sua 'massa' vem das energias cinética e potencial dos quarks. Com isso, desconstrói-se a massa na concepção newtoniana e apresenta-se a visão relativística do mundo. Toda essa discussão está no texto de apoio ao professor - aula 7, anexado no apêndice.

• **1º Momento aluno:** aproximadamente 30 min

Nesse momento, o professor deve distribuir e explicar a atividade 7A. Os alunos devem ser reunir em grupos de 4 ou 5 pessoas. Essa atividade é para eles calcularem a massa dos constituintes do próton e verificarem que a massa dos quarks correspondem apenas à 1% da sua massa total.

• **2º Momento Prof.:** aproximadamente 30 min

Esse é o último momento do professor no curso. Ele deve fazer uma recapitulação geral de tudo que foi falado e enfatizar as mudanças nos conceitos com a relatividade restrita. Esse momento deve ser de liberdade total, onde o professor, após um árduo caminho, deve retomar o 'filet mignon' do curso: o peso da energia, a desconstrução da massa newtoniana, a apropriação das propriedades da inércia e atratibilidade pela energia, a curvatura da luz num campo gravitacional (relatividade geral), etc...

Ativ. 7 e Gabarito - O peso do próton

Na exposição do professor de hoje, você viu que em sistemas ligados, a massa total desses sistemas não é dada apenas pela massa dos constituintes. As energias cinética e potencial desse sistema também entram na massa total do sistema.

O **próton** é considerado um sistema formado por três partes: dois quarks *up* e um quark *down*. Além deles, temos as energias envolvidas: **energia cinética** dos quarks T e o **potencial forte** U_q , que mantém os quarks ligados.

Assim, a energia total do próton pode ser escrita como:

$$E_{proton} = 2 m_u c^2 + m_d c^2 + T + U_q$$

e, o **peso do próton** é dado pelos 5 ingredientes da equação, representados abaixo.

A **massa do próton** pode ser obtida dividindo-se a expressão da energia por c^2 :

$$m_p = 2m_u + m_d + \frac{T + U_q}{c^2}$$

Os valores das massas dos quarks são extraídos de experimentos nos aceleradores de partículas e são fornecidos na tabela oficial de dados da comunidade de física de partículas, disponível no site do Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov>

Os valores das massas dos quarks *up* e *down*, em MeV, são:

u

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$

$$m_u = 2.3^{+0.7}_{-0.5} \text{ MeV}$$

$$m_u/m_d = 0.38-0.58$$

$$\text{Charge} = \frac{2}{3} e \quad I_z = +\frac{1}{2}$$

d

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$

$$m_d = 4.8^{+0.5}_{-0.3} \text{ MeV}$$

$$m_s/m_d = 17-22$$

$$\text{Charge} = -\frac{1}{3} e \quad I_z = -\frac{1}{2}$$

$$\overline{m} = (m_u + m_d)/2 = 3.5^{+0.7}_{-0.2} \text{ MeV}$$

Com base nos valores das massas dos quarks acima, determine a **soma das massas** dos quarks *u* e *d* no próton.

$$m_{total} = m_u + m_u + m_d$$

$$m_{total} = 2,3 + 2,3 + 4,8$$

$$m_{total} \cong 9,4 \text{ MeV}$$

A massa do próton também é medida experimentalmente e seu valor está na tabela abaixo.

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$

Mass $m = 1.00727646681 \pm 0.00000000009$ u

Mass $m = 938.272046 \pm 0.000021$ MeV [a]

$|m_p - m_{\bar{p}}|/m_p < 2 \times 10^{-9}$, CL = 90% [b]

$|\frac{q_p}{m_p} - \frac{q_{\bar{p}}}{m_{\bar{p}}}|/(\frac{q_p}{m_p}) = 0.99999999991 \pm 0.00000000009$

$|q_p + q_{\bar{p}}|/e < 2 \times 10^{-9}$, CL = 90% [b]

$|q_p + q_e|/e < 1 \times 10^{-21}$ [c]

Magnetic moment $\mu = 2.792847356 \pm 0.000000023$ μ_N

$(\mu_p + \mu_{\bar{p}}) / \mu_p = (0 \pm 5) \times 10^{-6}$

Electric dipole moment $d < 0.54 \times 10^{-23}$ e cm

Electric polarizability $\alpha = (11.2 \pm 0.4) \times 10^{-4}$ fm³

Magnetic polarizability $\beta = (2.5 \pm 0.4) \times 10^{-4}$ fm³ (S = 1.2)

Charge radius, μp Lamb shift = 0.84087 ± 0.00039 fm [d]

Charge radius, $e p$ CODATA value = 0.8775 ± 0.0051 fm [d]

Magnetic radius = 0.777 ± 0.016 fm

Mean life $\tau > 2.1 \times 10^{29}$ years, CL = 90% [e] ($p \rightarrow$ invisible mode)

Mean life $\tau > 10^{31}$ to 10^{33} years [e] (mode dependent)

Com base no valor da massa total do próton: $m_p = 938,27 \text{ MeV}$, responda:

(a) Qual a **porcentagem** da massa dos quarks na massa total do próton?

$$P (\%) = \frac{m_q}{m_p} = \frac{9,4}{938,27} = 0,0100 \cong 1\%$$

(b) Da onde vem o restante da massa do próton?

99% da massa do próton vem da energia cinética dos quarks e da energia potencial de ligação entre os quarks.

Roteiro da Ativ. 7 - Casa

Nome: _____ data: ____ / ____ / ____

No início deste curso, há 4 semanas, discutimos a organização da mecânica newtoniana e pedimos,

A equipe que desenvolveu esse curso também fez os mapas da mecânica e da relatividade e, para padronizar esta atividade, os apresentamos a seguir.

Com base nesses mapas e nas ideias apresentadas ao longo do curso, reflita, compare, explique e

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page, typical of notebook paper. There are no margins, text, or other markings on the page.

Avaliação final do curso

Nome: _____ data: ____ / ____ / ____

Esta avaliação deve ser feita sem consulta às suas anotações. Ela servirá para nós avaliarmos a efetividade do curso e podermos fazer as alterações que julgarmos necessárias para outras versões que serão possivelmente dadas no futuro.

(1) Nesse curso abordamos o conceito de massa e sua resignificação na história da física. Você seria capaz de lembrar da sequências das aulas? E os temas que abordamos em cada aula? Por favor, coloque os temas que abordamos em cada sábado.

1º sábado:

parte 1 - _____

parte 2 - _____

2º sábado:

parte 1 - _____

parte 2 - _____

3º sábado:

parte 1 - _____

parte 2 - _____

4º sábado:

parte 1 - _____

parte 2 - _____

(2) Você consegue ver alguma lógica na sequência das aulas? Como você justificaria essa sequência? Existe uma razão para os temas das aulas terem sido colocados nessa ordem?

(3) Você poderia citar aspectos, aulas, conceitos ou simplesmente exemplos que mais lhe chamaram atenção durante o curso? O que mais lhe chocou, positiva ou negativamente? O que mais lhe surpreendeu, positiva ou negativamente? (pode ser em relação ao conteúdo ou à forma como ele foi apresentado)

(4) Esse curso pretendeu, além de transmitir conteúdo, promover uma reorganização da física dentro de você. Ou seja, uma reorganização interior. Você sentiu alguma mudança em você mesmo sobre o olhar para a física?

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

(6) Se você algum colega seu de trabalho, também professor de física, fosse fazer o curso e lhe perguntasse sobre o que se trata, como você o resumiria em poucas linhas?

(7) Afinal de contas, qual foi a modificação que a **massa** sofreu com a relatividade restrita? O que aconteceu com a **inércia** e a **atrabilidade**? E qual é o principal significado da equação $E = mc^2$?

(8) Dissemos na última aula que a *energia pesa*, ou seja, é atraída pelo campo gravitacional. De que energia estamos falando?

(9) Qual é a mensagem do curso? (de cunho epistemológico, metodológico, educacional, conteudista,...)

(10) Finalmente... Qual é o seu grau de satisfação em relação ao curso?

(1) - não satisfeito

(2) - razoavelmente satisfeito

(3) - satisfeito

(4) - plenamente satisfeito

a) Eu estou ()

b) Eu gostaria que o curso fosse: _____

Use o espaço abaixo para exercer sua liberdade de expressão. Escreva o que quiser escrever!

Apêndice B - Filipetas preenchidas pelos alunos

Filipeta entregue aos alunos ao final de cada momento

Nome: _____ data: ____ / ____ / ____

Aula: _____ (1º ou 2º) Momento do _____ sábado

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual** :

(b) que **não** estava entendendo porque aquilo estava sendo falado:

.

.

.

.

.

.

.

.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

na segunda metade na 1ª fase da 2ª Lei de Newton.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

quando falando da 1ª e 2ª Lei de Newton

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

Passagem do habitual estado físico para o estado de movimento, e a relação entre a força, massa, movimento, etc. entre Newton e Galileu

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

A diferença entre massa inercial e gravitacional e as 3 formas de enunciar a 2ª Lei de Newton.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual : 2º momento:

- dedução das leis de conservação da energia cinética
1º momento: discussão sobre a "medida" da física e a física
moço (comum)

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

Depois do café, quando começar a se falar da energia e da massa inercial e gravitacional.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

Depois do café: momento, leis de Newton, História da Física moderna.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

A quebra da 3ª Lei de Newton

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

ao discutir a validade da 3ª lei de Newton e da 2ª conservação da qtd. momento com a transferência da qtd. de mom para os torn

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

entendimento de que é como funciona a troca de informação Liba! do curso de relatividade de joba, que eu não sei por que não entendi nada!

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

um explicar um caso em que a 3ª lei de Newton não vale

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

Idé. sobre as Leis de Newton
Ação/reação

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

Quando na atividade mostrei a que a terceira lei de Newton possui uma certa limitação

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

Discussão sobre a "validade" da 3ª Lei de Newton

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

A quebra da 3ª Lei de New pelo eletromagnetismo.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) **prazer intelectual :**

no contexto de ~~qual~~ sucessivos para atingir a conclusão de "qual" da física clássica.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

TAISSE EM COMPROVAR MAIS UMA VEZ
DEPOIS A GRADUACAO DA LIMITACAO DA MEC CLASSICA

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

E A ENERGIA E NAO A MASSA QUE CARREGA
OS ATRIBUTOS

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual : É que o professor consegue tornar as
exposições um assunto complexo em termos simples.
A aula é proveitosa. Entendo tudo, embora já tivesse
alguma dificuldade com a
teoria da relatividade.

(b) que não estava entendendo porque aquilo estava sendo falado:

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

a discussão sobre as várias definições e relatividade das
grandezas (massa, energia, tempo, espaço)

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

"DESPRAZAR" EM CONCLUIR QUE MASSA E
ENERGIA NAO SAO A MESMA COISA

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

Na discussão sobre massa e energia a ideia
como característica da energia e - massa como movimento

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual :

Implicações de uma massa invariante e ques-
tionamento das possibilidades de conversão de mas-
sa em energia.

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

Entender e dizer (tanto de raciocínio) ref. corrente
relatório de prova (r)

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

Dicas para discussões e simplificação de
alguns pontos que aparecem nas várias definições

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

a interpretação da equação que relaciona
memória com memória e repouso

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

Quanto a noção de continuidade da memória

Nesta aula, em qual instante ou tema você sentiu:

(a) prazer intelectual:

realização sobre o trabalho em um momento

(2) - razoavelmente satisfeito

(3) - satisfeito

(4) - plenamente satisfeito

a) Eu estou (4)

b) Eu gostaria que o curso fosse: MAIS LONGO PARA AUMENTAR
MEU PRAZER INTELECTUAL

Use o espaço abaixo para exercer sua liberdade de expressão. Escreva o que quiser escrever!

O PRAZER PELO CURSO NÃO SE ESCREVE
SE CURTE DURANTE ELA.

Use o espaço abaixo para exercer sua liberdade de expressão. Escreva o que quiser escrever!

Fui o ano o curso incrível. Gostei muito por ter tido tempo de estudar dequodamonti no tempo do curso e espero que consiga estudar a apostila e rever minhas notas de aula um breve para fazer o conhecimento adquirido. Qualquer coisa que for apontada no questionário é minha e não de vocês.

Use o espaço abaixo para exercer sua liberdade de expressão. Escreva o que quiser escrever!

Professores bem elaborado, professor bem capacitado.

Possam dar um de curso que gostamos de realizar:

- Voltado a sala de aula.
- Teor. e praz.
- Lei de Newton.
- Espelhos e lentes.

Mas no qual o curso foi nota 10.

Professores muito bem preparados e bem comprometidos com o projeto.

Use o espaço abaixo para exercer sua liberdade de expressão. Escreva o que quiser escrever!

Quero parabenizar a equipe pelo curso e pelas atividades que proporcionaram momentos de reflexão e que nos fizeram superar alguns desafios da física de uma maneira diferente da que se nos ensina na faculdade e nos ajudaram de muito.

Parabéns para todos!

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Gostei da dinâmica da aula e como trabalhava. Muito incentivamos as respostas que necessitamos partindo do básico que construímos.

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Gostei muito das definições de [redacted] e transmissões e cordões com propriedade.

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Gostei da dinâmica da aula e como paulatina-mente encontramos as respostas que necessitamos partindo do básico que conhecemos.

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Eu gostei da forma em que foram dadas as aulas e as aulas, a sequência. Gostei da maneira em que o professor fala e explica, é muito claro.

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Dicas de leituras e atividades que possam ser aplicadas na sala de aula. Sucessos deduzidos de fórmulas e leis.

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Gostei do ambiente propício ao interesse e da disponibilidade do professor em responder e discutir as dúvidas.

(5) O que você mais gostou no curso? O que você menos gostou no curso?

Gostei das reflexões sobre o que é ou não absoluto na relatividade. No geral gostei de tudo.

(3) Você poderia citar aspectos, aulas, conceitos ou simplesmente exemplos que mais lhe chamaram atenção durante o curso? O que mais lhe chocou, positiva ou negativamente? O que mais lhe surpreendeu, positiva ou negativamente? (pode ser em relação ao conteúdo ou à forma como ele foi apresentado)

Durante todo o curso foram feitas "comichões" como que havia sido discutido em aulas anteriores. Isso ajudou bastante no "surgimento" da questão. Em vários momentos a dedução matemática partindo de princípios conhecidos traziam uma lógica, suportada ao comportamento físico.

(3) Você poderia citar aspectos, aulas, conceitos ou simplesmente exemplos que mais lhe chamaram atenção durante o curso? O que mais lhe chocou, positiva ou negativamente? O que mais lhe surpreendeu, positiva ou negativamente? (pode ser em relação ao conteúdo ou à forma como ele foi apresentado)

O que mais me chamou atenção foi como foi a duração das aulas e a qualidade das aulas, interessantes em que os docentes com certeza são justos, algo que me agrada, mas a maneira como o conteúdo foi apresentado com um lado me surpreendeu, foi apresentado com uma linguagem clara e que não tem dificuldades para entender.

(3) Você poderia citar aspectos, aulas, conceitos ou simplesmente exemplos que mais lhe chamaram atenção durante o curso? O que mais lhe chocou, positiva ou negativamente? O que mais lhe surpreendeu, positiva ou negativamente? (pode ser em relação ao conteúdo ou à forma como ele foi apresentado)

Com minha opinião, não houve pontos negativos. As aulas ministradas pelo professor [REDACTED] foram magníficas. Explicou todos os temas detalhadamente e com clareza.

Acredito que todos nós, tivemos sorte de tê-lo como nosso professor durante este período.

Apêndice C - Relatos do professor implementador

ENERGIA NA FÍS. CLÁSSICA

RELATO PESSOAL - aula 1 - data: 14/09/13

Impressões, comentários, dificuldades, sentimentos, ...o que foi bom, o que não foi bom,...
...observações sobre a turma, observações sobre você mesmo...

- Particularmente, acho que ficou clara a distinção entre massa inercial e massa gravitacional. As atividades, principalmente a primeira (1A), fortaleceram essa distinção.
- Quanto à pessoa Marcos, senti-me, em alguns momentos, ansioso por ser a primeira vez que fazia tais discussões e isso pode ter transparecido de alguma forma.
- Sobre a turma, é participativa (alguns mais, outros menos).
- Meu sentimento foi de ter ficado clara a diferença da 1ª aula ($m_{inercial}$ versus m_{gravit}). Isso foi bem surpreendente.
- Em relação ao tempo para execução das atividades, acho que elas tomam mais tempo que o planejado e, portanto, não permitem se feitas as duas. O prof. pode escolher apenas uma.

RELATO – AULAS 02 E 03

Minha sensação acerca das duas aulas dadas nesse sábado foi de muito mais leveza. Na aula 01, estava me sentindo ainda muito tenso, essa tensão se devia ao fato de eu conhecer pouco a turma, ao fato de ser a primeira aula, enfim, tudo acabou pesando nesse sentido. Como relatei na semana seguinte, acho que o resultado da aula foi bom, pois atingimos, ao meu ver, o objetivo da aula 01 que era mostrar o papel que a força tem na mecânica clássica e a diferença entre massa inercial e massa gravitacional.

Com relação às aulas 02 e 03, a tensão passou. A aula fluiu melhor. Foquei bastante na ideia do papel que a energia ganha no discurso moderno. Por várias vezes, quis mostrar isso, de que estávamos entendendo um fenômeno sem nos referir ao uso de forças. O próprio estatuto ontológico do campo sugere isso: na física clássica, o campo aparece como atributo da carga e, na moderna, o oposto.

Entre as duas aulas, acho que a aula 03, relativa ao eletromagnetismo, fixou melhor a ideia do ganho de status ontológico do campo. A aula de sistemas ligados também fez isso, mas fiquei com uma sensação mais intensa de que a 03 deixou isso mais claro. De qualquer forma, mostrar que a massa do átomo de hidrogênio é menor que a massa do próton e elétron (quando livres) já aponta a relação entre a massa e energia. Tentei mostrar isso, mas não estou certo de que a turma percebeu, efetivamente, esta ideia: a massa estava sendo roubada e a principal suspeita era a energia.

Um raciocínio semelhante aconteceu com o eletromagnetismo: o capacitor ajuda a mostrar que a energia está no campo entre as placas e acho natural a ideia de que ondas eletromagnéticas carregam energia. Isso, acho, ficou claro. No fim, ao mostrar que a onda carrega momento (exemplo do espelho) e que, como o momento é atributo da massa, que a onda eletromagnética exerce impulso e pressão, entendo que procurei enfatizar, mas tenho dúvidas se esse raciocínio ficou fechado na cabeça de todos.

Continuo achando a sala muito reservada: fala pouco e sinto que têm receio de se expor. Finalmente, a atividade da onda eletromagnética ficou excelente. Os alunos discutiram, a interação foi muito boa e a conversa sobre a onda e suas propriedades foi muito rica. Essa atividade ajudou muito a cumprir os objetivos da aula.

Quero deixar registrado também que a atividade 1B, a que relacionava o problema da montanha russa (ejeção da massa) com a emissão do fóton na formação do átomo de hidrogênio não foi realizada e isso, ao meu ver, não prejudicou o cumprimento dos objetivos da aula.

3^o 543

RELATO PESSOAL - aula 04/05 - data: 28

Impressões, comentários, dificuldades, sentimentos, ...o que foi bom, o que não foi bom, ...
...observações sobre a turma, observações sobre você mesmo...

(conceitualmente)

A primeira parte da aula foi tranquila. Tratamos da quebra da 3^o lei. Acho que a discussão foi muito boa. Percebi certa inquietação na turma, alguns tentaram argumentar que a análise da desvalorização da carga nos levou um tanto a menos de um $\vec{B}$ e, portanto, que a análise foi um pouco limitada.

Quanto à segunda parte da aula, senti o clima mais tenso. O clima era mais denso (reclusão de), a turma é muito desigual (há alguns muito bons, outros que claramente têm dificuldade) e isso fez com que sentisse que essa aula foi a mais "tensa".

Para mim, senti muito desapoiado que vale mencionar: esse curso tem me proporcionado a oportunidade de ensinar certas coisas pela primeira vez e isso introduz algo difícil: saber algo é uma coisa, ensinar esse algo é muito mais complexo. (principalmente pela primeira vez). Soma-se a isso a dificuldade, a meu ver, de possuir um conhecimento de TR muito justo: eu me explico. É desconfortável dar aula de algo cuja extensão do nosso saber ronda o limite desse saber. Quando ensinamos algo, geralmente temos um conhecimento muito mais amplo e além do que ensinamos. Com a TR nesse curso, sinto meu conhecimento muito justo ao que falo e isso afeta meus alunos por vezes como a genética, metodologia.

ANÁLISE GERAL DA TLS

aula 1 - 1ª semana

Do ponto de vista conceitual, foi uma aula tranquila. Iniciou-se de uma revisão de fundamentos da mecânica newtoniana e não muito muitos problemas.

O que foi mais complicado nessa aula foi, sem dúvida, a apreensão e o nervosismo da 1ª aula. O fato de ser um curso no IFUSP teve seu peso também. Havia certa apreensão pelo público que estava presente. Esses são fatores que afetam fortemente como a aula ocorre: a ideia de aula precisa ser uma zona de conforto e não que isso precise ser conquistado ao longo do processo.

Aulas 2 e 3 - 2ª semana

Essa foi a semana mais confortável. Apesar do trabalho matemático, a ansiedade da primeira semana havia passado e o assunto, apesar de não ser elementar, foi desenvolvido com tranquilidade.

Do ponto de vista conceitual, esperava-se que quem assistisse possa ter percebido que a energia ganha um novo estatuto na física moderna, o que já prepara a ideia de que os conceitos da massa, na mec. clássica começam a se transpondo para a TR, digo, energia na TR.

Aulas 4 e 5 - 3ª semana

Essa foi, a meu ver, a semana mais delicada em termos conceituais. É a primeira vez que dou aula de TR. Mesmo que os conceitos estivessem bem sedimentados em minha cabeça, detectei um problema que certamente afeta nossa prática pedagógica: chamarei tal problema de folga intelectual.

Quando estamos de posse apenas da parte conceitual raramente vemos além. Pouca ou quase nenhuma relação além do próprio conceito é estabelecida. Implicações são raras.

É a folga que permite estabelecer relações e implicações. É ela que permite a um professor analisar uma questão do aluno, submetê-la à teoria, criar relações e ver implicações, não apenas técnicas, mas também epistemológicas, metodológicas ou mesmo éticas.

Nessa aula, principalmente na de TR (quadro de interrelacionamentos etc), minha folga era muito pequena e, portanto, senti algum desconforto para desenvolver o conteúdo.

Olhando a turma, não também tive na aula a mais complexa para os alunos. Alguns, inclusive, demonstraram isso pessoalmente.

aulas 6-7 - 4ª semana

Foi uma semana com conteúdo relativamente simples, do ponto de vista do desenvolvimento, mas impadante sob outros aspectos. Cito isso no início da aula em si.

Quanto à folga e ao espaço para relações e um

placação, pois que tudo correu bem.

Essa aula foi, sem dúvida, a aula de maior participação dos alunos, entre as que dei. O assunto ajudava, além de, num momento, certo grau de compreensão e confiança já ter sido se formado. Em é outro fator fundamental para uma boa aula.

Depois - Aulas 6-7

Foi uma aula bem tranquila. Como o fechamento do curso, tudo correu bem. O assunto da aula ajudou muito, pois era, em certo sentido, uma aplicação dos conceitos discutidos ao longo do curso.

Na aula 6, sem dúvida, a ideia de massa invariante "pegou fundo". Muitos já haviam feito cursos de relatividade durante a graduação e nunca tinham visto isso.

Chamei-me a atenção a discussão de $m = \gamma m_0$. E comentei a ideia de uma massa de repouso e de que a massa aumenta. Como justificar a invariância da massa com o $m = \gamma m_0$? Essa discussão foi bem interessante, pois suscitou conversas valiosas sobre o estatuto de modelos e sobre a passagem do mundo da matemática para o mundo da física. Creio que é aí que reside a passagem de $m = \gamma m_0$ para a massa invariante.

Quanto à aula 7, foi tranquila. Ela é bem compreensível, pois é menos abstrata teoricamente que as anteriores. Entretanto, há algo pouco amigável: que coisas convertemos a massa e as ligações pesam na balança. A ideia de que 99% do que pesamos em uma balança é massa "não-relativística" é algo difícil de aceitar: captamos num primeiro momento, mas a informação não é prontamente internalizada.

Apêndice D - Lista de Tarefas das Aulas

Aula 1 - Energia e Trabalho na Física Clássica		
<i>n^o</i>	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Localizar a energia no quadro e justificar com o T. Nöether	meio
2	Apresentar o papel da força : Newton X Leibniz, T. Impulso e T. E. Cinética	meio
3	Mostrar a dedução da conservação da energia a partir do T.E.Cinética para o sistema Terra-Sol. Atividade 1A.	meio
4	Discutir a questão da inércia num problema de choques. Atividade 1B.	fim
	Significado da inércia	M.E.
5	Discutir as propriedades da matéria : inércia e atratibilidade no universo newtoniano	fim
	Significado da massa gravitacional e inercial	M.E.

Aula 2 - Sistemas Ligados e o Átomo de Hidrogênio		
<i>n^o</i>	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Discutir poço de potencial em sistemas físicos reais, como a bolinha em diversas situações	meio
2	Apresentar o átomo de hidrogênio e construir o gráfico do potencial coulombiano	meio
3	Calcular as energias do átomo e relacioná-las com os poços da bolinha presa mencionada anteriormente	meio
4	Discutir a energia de ligação e a quebra do átomo, baseado no gráfico do potencial	fim
	Significado da energia de ligação	M.E.
5	Discutir os aspectos epistemológicos (modelos, fenomenologia e teoria) do átomo	meio
6	Apresentar as reações exotérmica e endotérmica, bem como o processo energético para construir um átomo	fim
	Significado de uma reação exotérmica	M.E.

Aula 3 - Energia e Momento no Eletromagnetismo		
<i>n^o</i>	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Apresentar as cargas elétricas e os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ como atores do quadro do universo físico clássico e o campo de uma carga em repouso	meio
2	Associar o campo à densidade de energia dU/dV e fazer o cálculo em alguns exemplos	meio
3	Calcular a energia dentro de um capacitor	meio
4	Discutir aonde está essa energia e mostrar variações do capacitor	fim
	Significado: existência da energia numa região sem matéria	M.E.
5	Calcular a densidade de energia para duas cargas puntiformes, chegar na auto-energia e discutir o seu significado relacionando com $E = mc^2$	meio
6	Introduzir as ondas eletromagnéticas e mostrar que elas carregam energia (vetor de Poynting)	meio
7	Discutir a incidência da luz numa superfície e a transferência de momento	fim
	Significado: algo sem massa pode carregar momento	M.E.

Aula 4 - Radiação Eletromagnética e Ação-Reação		
n^o	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Mostrar como são as linhas de campo de uma carga parada e em movimento uniforme	meio
2	Discutir o caso de desaceleração, a bolha de informação e fazer o desenho da deformação das linhas de campo	meio
3	Discutir que na região de transição $\partial \vec{E}$ gera $\vec{B}$, o que corresponde a uma onda eletromagnética que se propaga. Mostrar o simulador <i>radiation 2D</i>	meio
4	Mostrar que a 3ª lei de Newton não vale para essa situação	fim
	Significado: ruptura da mecânica	M.E.
5	Discutir a conservação do momento nesse caso e enfatizar que onda carrega momento	fim
	Significado: luz tem inércia e momento	M.E.

Aula 5 - Relatividade: absolutos e relativos		
n^o	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Discorrer sobre uma teoria de relatividade genérica e a relatividade geométrica	meio
2	Apresentar a relatividade restrita , seus princípios e compará-la com a relatividade geométrica	meio
3	Mostrar que ambas relatividades (geométrica e restrita) existem absolutos - dar exemplos	fim
	Significado: absolutos na relatividade restrita	M.E.
4	Apresentar as transformações de Lorentz e o seu uso para mudanças de referenciais	meio
5	Definir o produto escalar em geometria e dar o salto para a relatividade (produto escalar em 4 dimensões)	fim
	Significado: produto escalar num espaço 4-D	M.E.
6	Calcular os intervalos relativísticos e mostrar que eles são invariantes	meio
7	Chegar no conceito de tempo próprio e discutir seu significado na relatividade restrita	meio
	Significado: tempo próprio	M.E.

Aula 6 - Relatividade: massa e energia		
<i>n^o</i>	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Definir o quadrimento na relatividade restrita a partir do tempo próprio	meio
2	Discutir o significado da 4 ^a componente do e chegar no conceito de energia em dois referenciais diferentes	fim
	Significado: $E = mc^2$ e $E = \gamma mc^2$	M.E.
3	Calcular o p^2 (produto escalar $\vec{p} \cdot \vec{p}$) e chegar na massa invariante	fim
	Significado: massa é invariante relativístico	M.E.
4	Discussão epistemológica e ontológica sobre a massa e a energia, percorrendo e interpretando todos os resultados apresentados	fim
	Significado: inércia da energia	M.E.

Aula 7 - $E = mc^2$ em ação...		
<i>n^o</i>	lista de tarefas	classif. das tarefas
1	Abordar uma reação exotérmica genérica	meio
2	Mostrar que Lavoisier vale para a reação de combustão	meio
3	Calcular a energia do fóton emitido na reação $p + e$ (átomo H)	meio
4	Calcular a energia do gama emitido na reação $p + n$ (dêuteron)	meio
5	Discutir outros núcleos (mais pesados) e mostrar que Lavoisier não vale na física nuclear	fim
	Significado: massa não se conserva	M.E.
6	Mostrar os elementos que contribuem para o peso do hidrogênio e suas porcentagens	meio
7	Mostrar os elementos que contribuem para o peso do dêuteron e suas porcentagens	fim
	Significado: energia cinética e potencial pesam	M.E.
8	Entrar dentro do próton e mostrar os elementos que dão massa a ele	fim
	Significado: energia cinética e potencial pesam muito	M.E.
9	Discussão conceitual: o peso da energia , a inércia da energia, atração gravitacional da energia, trajetória curva da luz na relatividade geral	fim
	Significado: atributos da massa newtoniana vão para a energia	M.E.