

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM EDUCAÇÃO

**A INSERÇÃO DA TEORIA DA RELATIVIDADE NO
ENSINO MÉDIO.**

**Dissertação de mestrado em
Educação - Linha de investigação :
Educação e Ciência**

**CARLOS DANIEL OFUGI RODRIGUES
Prof. Dr. Maurício Pietrocola - Orientador**

**Florianópolis - Santa Catarina
2001**

APRESENTAÇÃO

No primeiro semestre de 1994, quando cursava a terceira fase do curso de física, ingressei no PET (Programa Especial de Treinamento), onde comecei a aprofundar meus conhecimentos na área de Física Computacional, além de participar de seminários referentes a pesquisas realizadas no Departamento de Física. Durante um período aproximado de 5 meses, mantive contato com outros PET's e fui tomando consciência da rotina e das tarefas que permeiam a pesquisa na universidade.

A troca de conhecimento era muito intensa como também a cobrança por resultados, mas o prazer de conhecer e poder adentrar em ramos desconhecidos e fascinantes da ciência me fizeram continuar e almejar a cada dia um aprofundamento maior. Infelizmente, em 1995 o PET da Física foi extinto. Logo em seguida, surgiu a oportunidade de desenvolver um projeto junto à área de ensino, e foi então que comecei minhas pesquisas no âmbito da história da ciência e travei meus primeiros contatos com as questões educacionais como bolsista de iniciação científica.

Minhas pesquisas, foram norteadas pela Relatividade Restrita, sua história, suas conseqüências na Física, seu ensino. Os dois projetos desenvolvidos enquanto acadêmico foram: 1) Uma Análise Crítica da Abordagem da Relatividade Restrita em Livros de Física Básica e 2) Elaboração de um Texto Introdutório de Relatividade com Suporte "Justificacional"

No primeiro deles examinei como a teoria da relatividade restrita era abordada em alguns livros¹ de Física Básica adotados pelas universidades brasileiras. A pouca ou nenhuma ênfase aos aspectos históricos do processo de surgimento e desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita fragiliza a compreensão e apreensão, por parte do aluno, dos novos conceitos de espaço, tempo, massa e energia. A própria falta de "porquê" das questões ou dos princípios apresentados nestes livros, mostrava a fragilidade da base

¹ Os livros analisados fora: *Feynman*, Richard Phillips. " *The Feynman lectures on physics mainly mechanics, radiation, and heat*". vol. 1, Estados Unidos da América. Fundo Educativo Interamericano, S.A., 1971; *Mckelvey*, John P. & Grotch, Howard. " *Física*". São Paulo: editora Harper & Row do Brasil Ltda. 1981; e *Tipler*, Paul A. " *Física*". Rio de Janeiro: editora Guanabara Dois S.A. 1984.

argumentativa por parte dos autores ao apresentar uma teoria tida como um marco na evolução do conhecimento. Em anexo a esse trabalho apresentei mapas conceituais tridimensionais que retratavam a forma de encadeamento das informações contidas em cada livro analisado.

No segundo projeto, desenvolvido no segundo semestre de 1996 e primeiro de 1997, elaborei um texto que buscava uma nova forma de apresentação da Relatividade Restrita. O resultado encontrado em meu primeiro projeto, quando analisei livros de física básica, apontava para falhas quanto ao aspecto justificacional, isto é, a apresentação dos princípios suportes da teoria era feita de forma dogmática, deixando de lado a exploração dos motivos pelos quais ocorreu a ruptura com o clássico. Neste intuito, elaborei um texto que apresentava dois segmentos complementares: um problema que envolvia o Aparelho de Ampère² (possibilitou a introdução da Relatividade partindo de um problema gerado no seio da teoria clássica) e um anexo histórico referente ao éter e alguns experimentos que buscavam sua detecção, a fim de embasar melhor o aluno em minhas argumentações.

A formatura veio logo em seguida à conclusão desses dois projetos, mas por manter contato com o GPEF (Grupo de Pesquisa em Ensino de Física) do Departamento de Física da UFSC, continuei pesquisando e desenvolvendo algumas atividades nessa mesma linha.

Existem ainda alguns outros trabalhos desenvolvidos, mas os supra citados foram selecionados especialmente para demonstrar a seqüência que meu trabalho tem seguido e o porquê da origem do meu projeto. A Teoria da Relatividade tem servido de pano de fundo para avaliar e propor questões ligadas à educação científica.

Várias questões de cunho educacional surgiram ao longo do percurso enquanto pesquisador ou Professor de Física. Na ânsia de ensinar conteúdos que, para mim, são tão importantes, me deparei com dificuldades que pareciam, muitas das vezes, intransponíveis. Uma parte dessas questões gira em torno do ensino de física moderna no Ensino Médio. Como se pode perceber, o ensino

² O aparelho de Àmpere é constituído basicamente por dois fios paralelos, separados por uma distância D fixa.

especificamente de Relatividade (que faz parte da física moderna) têm sido foco das minhas questões de pesquisa; mas..... por quê ?

CAPÍTULO 1

DA NECESSIDADE DE INSERIR A TEORIA DA RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO

I.1 - INTRODUÇÃO

A física é uma ciência, e como tal se encontra sempre em desenvolvimento. No entanto, neste último século, a quantidade de inovações e rupturas com visões anteriores tem alcançado um número muito grande, se comparado ao de outros períodos de sua história. O espectro do conhecimento físico, tanto no sentido do micro quanto do macro foi ampliado, em decorrência de rupturas com conceitos e significados clássicos. Teorias como a Relatividade e a Física Quântica têm servido de suporte na produção de novos conhecimentos em um novo panorama científico.

Essas mudanças, no entanto, não se restringem ao universo científico, pois ultrapassam barreiras em rumo à sociedade em geral. Elas se manifestam, por exemplo, através das novas tecnologias, dos novos recursos e comodidades. Hoje em dia, ouvimos uma música digitalizada, manuseamos computadores que utilizam transistores, a iluminação pública conta com fotosensores, a medicina dispõe de aparelhos de ressonância magnética, as usinas nucleares são cada vez mais utilizadas na produção de energia em muitos países, fósseis e objetos cerâmicos antigos são datados através de contadores radioativos e o laser têm revolucionado as técnicas cirúrgicas médicas.

Mesmo os fenômenos espontâneos como a luz emitida pelo Sol e estrelas, e a fotossíntese, podem ser melhor compreendidos se utilizarmos a Física Moderna e Contemporânea (FMC).

O nosso cotidiano se encontra amplamente modificado pela ciência e pela tecnologia, de forma que a separação entre natural e artificial não é clara. As palavras *natural*, *natureza* e *artificial*, são freqüentemente empregadas em várias frases ou expressões visando o estabelecimento de fronteiras: comida natural,

natureza humana, reação natural, bronzeamento artificial, entre outras. A análise do significado dessas palavras nos remete a questionamentos profundos sobre, por exemplo, se chegamos a nos afastar em algum momento da natureza, de forma a sentir a necessidade de restabelecer contato com ela, se existe uma comida que não seja natural, ou se existe diferença entre os raios ultra-violetas produzidos em uma câmara de bronzeamento e os emitidos pelo Sol. O porquê de um suco de laranja ser considerado industrializado, apesar de ser feito de laranja. Assim também acontece com o tijolo que, embora feito de barro não é tido como natural ! Qual será o critério adotado para diferenciarmos o natural e o artificial?

Para muitos, algo deixa de ser natural quando sofre algum tipo de ação humana. Por exemplo, um rio é natural até que alguém decida transformá-lo em represa. A intencionalidade associada à ação transformaria o natural em artificial.

Mas, mesmo apontando a intencionalidade como critério de diferenciação, este não é o ponto final da questão pois, se assim fosse, tudo seria artificial. Tudo o que conhecemos ou usamos tem por detrás uma intenção. Os meios pelos quais chegamos a formar uma concepção da “coisa” desconhecida parte das nossas experiências anteriores, do nosso paradigma, isto é, não faz sentido dizermos que algo existe sem que tenhamos tido alguma interação intencional com este algo. A intenção a que nos referimos não precisa ter fins práticos, isto é, abrange também a busca da compreensão da natureza e seus processos, por prazer ou ideal.

ROBILLOTTA³ nos auxilia a responder esses questionamentos:

Uma fábrica, não obstante ser feita de materiais naturais, não é “natural” por incorporar de modo forte as intenções humanas. O ser humano, neste quadro, torna-se o responsável (culpado?) pelas coisas artificiais. Essa contradição entre natureza e ser humano é parte de uma dualidade, já que o ser humano também constitui a natureza, participa dela, tem-na incorporada dentro de si. Por outro lado ao percebê-la, ao interferir em seus processos, ao conhecê-la, ele de algum modo se distancia dela.

³ ROBILLOTTA (1985), p. 1

Assim, parece mais correto dizer que natural/artificial são os dois lados de uma mesma moeda. Uma relação dialética por excelência, onde homem e natureza são agentes e pacientes ao mesmo tempo⁴.

Segundo Fourez⁵:

(...) para observar, é preciso sempre relacionar aquilo que se vê com noções que já se possuía anteriormente. Uma observação é uma interpretação: é integrar uma certa visão na representação teórica que fazemos na realidade...

Assim, de atributo ontológico do mundo, a natureza deve ser o produto de nosso entendimento. Isto pode ser melhor visualizado num exemplo.

Se a humanidade se constituísse numa espécie de indivíduos cegos, por exemplo, a sua ciência certamente teria desenvolvido outras teorias para explicar o mundo. No filme “À Primeira Vista”, o personagem principal retrata muito bem a dificuldade encontrada por um ex-cego ao tentar reinterpretar o mundo que o cerca. Cego desde muito pequeno e, portanto já adaptado à essa condição, têm a sua visão recuperada após uma cirurgia na retina. Uma maçã, por exemplo, que antes era reconhecida pela textura, formato e cheiro, passa a ser identificada pela sua forma e cor, mas.... o que é forma ou cor ? O que é bonito ou feio ? A retina até então sem função alguma capta imagens bidimensionais, mas o cérebro ainda não aprendeu a transformá-las em tridimensionais, a ponto de impossibilitá-lo de distinguir uma maçã de sua foto.

ROBILOTTA⁶ mostra que a noção de espaço tridimensional que nos parece tão óbvia, a ponto de ninguém precisar convencer o outro de que o espaço apresenta largura, altura e profundidade na verdade é fruto de construção através das associações entre visão, avaliações interpretativas e principalmente memória. Ele relata a experiência de pensamento do “homem planta” para demonstrar sua assertiva:

⁴ LENOBLE (1975)

⁵ FOUREZ (1995), p. 40

⁶ ROBILOTTA (1985)

(...) suas percepções visuais revelariam um mundo de duas dimensões, “para cima e para baixo, para a direita e para a esquerda”; a terceira dimensão com a qual todos nós somos familiares, qual seja, “para longe ou para perto de”, estaria faltando. Como resultado, as formas que se retorcem passando através de seu campo de visão seriam interpretadas como denunciando um mundo bidimensional de formas variáveis, que não estariam ligadas de modo algum à existência de uma terceira dimensão....

Desse modo a visão, atuando isoladamente, pode levar aos conceitos de largura e altura, mas não ao de profundidade..”

O fato dos seres humanos não serem “homens-planta” possibilita a associação entre movimentos musculares e certas variações percebidas pela visão. Assim, o fato de um carro alterar suas formas no campo visual de um observador que se move não é atribuído ao aumento ou diminuição de suas dimensões, e sim, ao seu deslocamento.

Ainda no filme “A Primeira Vista”, um fato que pareceria loucura se não fosse realizado dentro do contexto apresentado, é retratado quando o personagem descobre que o fato das dimensões da imagem de um objeto aumentarem, está associado à aproximação deste. Ao avistar um carro se aproximando, ele se dirigia à rua e se posicionava na frente do automóvel que trafegava, até o momento em que ele julgava estar bem próximo. Neste instante ele saltava em direção à calçada.

Todos esses exemplos nos mostram que ninguém consegue enxergar o mundo de uma forma neutra. Até o ato de enxergar tem que ser aprendido, pois se trata de interpretar informações sem significado à priori. Fruto de tantas experiências e aprendizados então, é o mundo de hoje, que chega a ser significativamente diferente daquele encontrado há algumas décadas atrás, pois hoje temos ambientes socialmente muito mais modificados pela ciência/tecnologia.

O reflexo disto na área do ensino de Física é uma necessidade de atualização curricular no intuito de implementar ferramentas cognitivas e conhecimentos que auxiliem na interpretação deste novo mundo.

PAULO⁷, em sua dissertação de mestrado inova ao fazer um levantamento sobre as concepções alternativas que permeiam a estrutura cognitiva do aluno quando este se encontra no ensino médio, a cerca de alguns tópicos da Física Moderna. A autora parte do pressuposto de que a interação do estudante com o mundo propicia a existência dessas concepções alternativas.

Das conclusões alcançadas por PAULO em seu estudo, destacaremos algumas: as concepções espontâneas e/ou alternativas sobre FMC fazem parte do universo dos alunos nas escolas; são concepções estruturadas por informações extracurriculares trazidas pela interação entre aprendiz-mídia, ou ainda, aprendiz-tecnologia; a falta de suporte conceitual da FMC, via ensino formal, torna difícil a aquisição de conceitos científicos mais elaborados que levem o aluno a estruturar as suas concepções de maneira coerente com o conhecimento científico. O trabalho é finalizado com a reafirmação da necessidade de se introduzir tópicos de Física Moderna no Ensino Médio “para proporcionar ao aprendiz uma visão menos pragmática da ciência e mais ampla do mundo.”⁸

O trabalho supracitado ressalta, portanto, a forte influência das informações veiculadas pela mídia sobre o aluno do Ensino Médio. Sabemos que essas influências advêm de várias formas de divulgação da ciência na sociedade. Temos, por exemplo, os meios apropriados para difusão da produção científica, onde se relatam biografias de cientistas, anunciam-se novas teorias, mostram-se fatos/implicações curiosas das mesmas, enfim, difunde-se o que ocorre na comunidade científica. Podemos citar programas e/ou canais televisivos, como a Discovery Channel, que oferece relatos de descobertas científicas, de biografias. Revistas como a SuperInteressante, Galileu Galilei, Ciência Hoje e Ciência Hoje para as Crianças transmitem ao público em geral as notícias do mundo da ciência. Livros como “A Dança do Universo” e “O Incrível Mundo da Física Moderna”, buscam levar ao público em geral o conhecimento elaborado no seio da ciência. Não poderíamos deixar de citar os sites da internet e CD’s que utilizam recursos múltiplos, como som, vídeo, texto e imagem.

⁷ PAULO (1995), p. 10

⁸ PAULO (1995), p. 81

Uma outra forma de divulgação científica engloba o “marketing científico”, isto é, à difusão de nomes e teorias científicas atrelados a produtos ou marcas. Não raro, nos deparamos com cartazes que usam a célebre figura de Einstein com a língua de fora para chamar a atenção.⁹ Ao buscar a opção “ajuda” do programa Microsoft Word 2000, encontramos um mini-Einstein fornecendo as informações necessárias para solucionar problemas. Colégios empregam Einstein em seu nome, como o Colégio Einstein em Goiânia¹⁰. Além de “homenagear” a genialidade do cientista citado, utilizam-no como sinônimo de seriedade, atualidade e competência da instituição.

Portanto, o que ocorre na atualidade é uma forte penetração da Física Moderna e Contemporânea na comunidade em geral através de dois caminhos: as tecnologias e a mídia.

É este quadro que se têm refletido no campo educacional, na medida em que os alunos também participam dessa realidade, seja usufruindo as comodidades tecnológicas, seja se deparando com nomes e figuras veiculadas como “geniais” da ciência. A ficção científica estimula a imaginação do adolescente – e não só do adolescente – instigando ainda mais a sua busca pelo novo, pelo virtual ou pelo genial. No entanto, a escola não consegue lidar adequadamente com os conhecimentos necessários para o entendimento do que se passa a sua volta.

Uma questão de fundo que pode ser feita neste momento é a seguinte: de que forma um cidadão, que não compartilha das teorias científicas contemporâneas, pode compreender as informações presentes nas mídias, ou ainda, como pode decodificá-las, visto que desconhece tal linguagem? Como desmitificar as contribuições realizadas por cientistas na atualidade? A solução deve passar por uma revisão da formação ao longo do Ensino Básico.

O estudo da física deve contribuir na formação de um cidadão para que este possua formas de atuar com discernimento frente a esse mundo modificado! A sociedade deve ser capaz de absorver as novas produções científicas, entendendo minimamente as informações que lhe chegam através dos meios de

⁹ Um anúncio na Internet oferece a oportunidade de, através dos cursos de fotografia da empresa, montar uma foto ao lado de Albert Einstein.

¹⁰ Podemos citar o nome de pelo menos quatro colégios só no Estado de São Paulo: Escola Einstein, em Limeira; Liceu Albert Einstein, em Piracicaba; Colégio Albert Einstein, em Guarulhos; Colégio Albert Einstein de Osasco, em Osasco.

comunicação ! O usuário de um produto não se pode deixar levar simplesmente pelo nome que tem um produto, nem tampouco deve utilizar inadequadamente frases científicas descontextualizadas! Afinal de contas, qual o poder de argumentação e de negociação de um homem que não possui tais conhecimentos?

A Física, portanto, deve ser apresentada como um elemento básico para a compreensão do mundo atual, para o entendimento de concepções do mundo físico que existiram ao longo da história e para a satisfação cultural do cidadão atual.

Muitos pesquisadores na área de ensino de ciências defendem a introdução da Física Moderna e Contemporânea numa perspectiva utilitarista, isto é, a compreensão da FMC como ferramenta de atuação no mundo atual.

VALADARES & MOREIRA¹¹ defendem a necessidade do estudante do ensino médio conhecer os fundamentos da tecnologia atual, já que ela atua diretamente em sua vida e pode definir seu futuro profissional. É importante a introdução de conceitos básicos de FMC e, em especial, fazer a ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano.

PEREIRA¹² concorda sobre o fato do mundo contemporâneo ser altamente tecnológico e que para compreendê-lo é função da escola, principalmente dos programas de Ciências Naturais e Sociais e de Física, Química e Biologia, incluir no seu currículo os assuntos relevantes para a formação de um cidadão esclarecido sobre o que o cerca. Uma pessoa que seja capaz de tomar suas decisões, assim como desempenhar sua função social e econômica de forma condizente com a época em que vive.

Fourez¹³ se mostra preocupado com os fatores políticos, sócio-econômicos e culturais que permeiam o ensino, levando em conta o impacto e a transformação possível diante de um ensino de ciências que promova a Alfabetização Científica e Tecnológica (ACT) do aluno. Ele traça um rápido panorama da emergência do conceito de alfabetização científica, expondo as fases pelas quais passou o ensino de ciências desde a década de 1950, com suas respectivas ênfases e objetivos.

¹¹ VALADARES & MOREIRA (1998)

¹² PEREIRA (1997)

¹³ FOUREZ (1994)

Salienta ainda que o conceito de Alfabetização Científica como norteador do ensino de ciências decorre do que ele chama de 'crise no ensino de ciências'¹⁴. No primeiro capítulo de seu livro, lista e comenta os itens do que seria uma ACT de acordo com a *National Science Teacher Association*(NSTA), entre elas:

- *utilizar conceitos científicos e ser capaz de integrar valores e saber-fazer para tomar decisões responsáveis na vida cotidiana;*
- *reconhecer tanto os limites quanto a utilidade das ciências e das tecnologias para o progresso do bem-estar humano;*
- *conhecer os principais conceitos, hipóteses e teorias científicas e ser capaz de aplicá-los;*
- *compreender que a produção de conhecimentos científicos depende tanto de processos de pesquisa quanto de conceitos teóricos;*

Fourez critica a ausência da história das ciências no documento da NSTA, e sugere o acréscimo de um item: ter a compreensão da maneira pela qual as ciências e tecnologias foram produzidas ao longo da história.

Embora o interesse pela ACT seja polarizado por múltiplas perspectivas, ele tem três objetivos básicos: a autonomia do indivíduo (componente pessoal); a comunicação com os outros (componente cultural, social, ética e teoria); e o domínio do meio ambiente (componente econômica)¹⁵.

O autor considera qualquer coisa como ACT, quando seus saberes procuram dar alguma autonomia, possibilitando que o aprendiz tenha capacidade para negociar suas decisões, alguma capacidade de comunicação (encontrar maneira de dizer) e algum domínio e responsabilização face à situação concreta.

Fourez¹⁶ sinaliza para uma reforma educacional, colocando que o ensino de ciências por disciplinas não tem realizado o papel que deveria, tendo em vista que o objetivo maior deste tem sido a substituição das representações espontâneas dos alunos pelos modelos científicos. No entanto, já se sabe através de estudos

¹⁴ Tal crise é diagnosticada por dois relatórios: um, de 1993 para o *Fórum do projeto 2000+* da UNESCO, outro, de âmbito norte-americano, da década de 1980, a *Nation at Risk*. Tal crise deu lugar a tentativas para renovar o ensino de ciências e religar esta última ao seu contexto humano. Fourez identifica vários eixos neste movimento: valores econômico-políticos, valores sociais e valores humanistas.

¹⁵ FOUREZ (1994), cap. 3

¹⁶ FOUREZ (1994), p.185

na área de concepções alternativas e mudança conceitual¹⁷ que essa substituição não ocorre da forma que se pensava. Pode existir uma conscientização das chamadas concepções espontâneas e até mesmo uma reformulação dos seus significados, no entanto, a forma com que esses modelos têm sido tratados não permite a aplicação do conhecimento no cotidiano.

Terrazan¹⁸, a exemplo de Fourez, descreve a física escolar como sendo capaz de fornecer instrumentos conceituais de caráter utilitário e operacional para a vida cotidiana. No entanto, este autor não se limita a essa argumentação, ao defender que a física escolar também é capaz de propiciar princípios gerais sobre os quais se baseiam as explicações dos fenômenos do mundo natural e do mundo tecnológico.

A física como cultura também é uma bandeira empunhada pelos pesquisadores.

A corrente tecnológica não é a única influência da FMC no cotidiano dos cidadãos em geral, pois a divulgação científica ocorrida através dos meios de comunicação também tem ocasionado este efeito. Zanetic¹⁹ aponta a necessidade da Física no Ensino Médio ao mostrar que:

o desenvolvimento da física é parte integrante da história social, é um produto da vida social, estando assim condicionada. Há uma imensa gama de fatores e interesses, que são cambiantes dependendo da época em que determinadas teorias e concepções sobre o mundo foram desenvolvidas.

Se pensarmos em alguns conhecimentos que fazem parte da cultura de um povo, como o estudo de línguas, podemos vislumbrar algumas considerações importantes sobre o que deve ou não ser tratado dentro do corpo de conhecimento que a abrange. Sabemos que, em um curso de literatura, é lícito abordar no mínimo as escolas literárias mais importantes, desde as mais antigas às mais recentes. Isso se deve ao fato de que, apesar de existirem predominâncias de umas frente a outras nos dias atuais, é importante que o aluno

¹⁷ POSNER (1982)

¹⁸ TERRAZZAN (1994)

¹⁹ ZANETIC (1989), p. 22

tenha um conhecimento básico sobre todas elas. Isso possibilita ao aluno se interessar, por exemplo, pelo Romantismo e não pelo Modernismo, desde que saiba o porquê de sua preferência. Assim também deveria ser um curso de física, não desprezando a física clássica, mas não deixando de fora a física moderna.

Mas, será que as revistas de divulgação não cumprem o papel de embasar o aluno sobre a física moderna, ao disponibilizar tanto material para o público sobre esse assunto? Com certeza existe uma gama de materiais nesta área sendo introduzida nos meios de comunicação diariamente, mas qual o poder de crítica, de critérios de seleção, de opinião frente a uma reportagem que uma pessoa não formada possui ?

Para que se possa avaliar e até mesmo selecionar o que ler e se atualizar, há que se ter uma formação nesta área. Isto implica participar de um processo de sistematização do conhecimento a ponto de poder ter elaborado e desenvolvido estruturas cognitivas capazes tanto de identificar os momentos em que uma dada teoria é válida (estabelecer fronteiras entre a teoria e o real, entre essa teoria e outras) quanto saber a forma com que a aplicação deste corpo teórico deve ser realizada. Sabemos que até mesmo um repórter, por exemplo, que está em contato direto com os acontecimentos de cunho científico, por não ter sido submetido a um processo formativo, comete erros e sente dificuldade em desempenhar criteriosamente seu trabalho.

É notório que a pessoa não possuidora de um mínimo de conhecimento, por exemplo, das implicações que uma série de radiografias podem causar em seu organismo, jamais questionará a orientação de um profissional que solicite várias chapas do pulmão ou de qualquer outra parte do seu corpo. Assim também um adolescente que não tem consciência dos efeitos que os raios ultra-violetas podem causar na retina jamais terá como fator de decisão na compra de óculos escuros a qualidade da lente em relação à filtragem desses tipos de raios. Se pensarmos em uma situação de proporções maiores, um cidadão que não conhece os mecanismos de funcionamento de uma usina nuclear, não consegue argumentar a favor ou contra a implantação desta forma de geração de energia em sua cidade ou estado; ou ainda saber as conseqüências/riscos de morar numa área próxima a tal usina.

Se a população em geral realmente conhecesse os efeitos da radiação sobre o corpo, o incidente ocorrido na cidade de Goiânia em 1988 (vazamento de Césio) não teria tomado tamanha proporção²⁰.

Assim, a FMC deve ser tratada no EM para que o aluno consiga compreender as notícias que são veiculadas nas diversas formas de divulgação e para que o interesse pela história da física, bem como dos seus processos internos seja despertado. Se por outro lado, assumimos que a divulgação científica tem alcançado seu objetivo – o de informar à população sobre o que têm ocorrido na comunidade científica – ainda assim uma reavaliação curricular se faz necessária. Estando instituído o descompasso entre o que é de conhecimento geral e é ensinado na escola, não se justifica mais a predominância exclusiva da Física Clássica no EM. A legitimidade do ensino de física no EM seria questionada. Ensinar uma física “ultrapassada”, enquanto os alunos já conhecem a recente não parece uma postura coerente do ensino de Física.

Uma alteração sócio-cultural ou tecnológica produz efeitos no currículo escolar, definindo o que é ou não importante para a formação de um cidadão atuante e consciente de suas potencialidades, capaz de entender, refletir e modificar a estrutura montada ao seu redor. Se algumas práticas ou conteúdos se tornam obsoletos para esse processo, não necessitam ser tratados no ambiente escolar, dando lugar aos que emergem na sociedade modificada.

Pensemos em um exemplo claro e ocorrido recentemente. Algumas escolas ofereciam cursos de datilografia em máquinas de escrever manuais e elétricas para seus alunos, visando a melhor qualificação para o ingresso no mercado de trabalho, além de possibilitar o domínio dessa tecnologia que invadiu todos os escritórios e os serviços em geral. Na década de 70, saber datilografar era fundamental no currículo do cidadão que buscasse um bom emprego; pois o que antes era privilégio de poucos, rapidamente se transformou em uma necessidade geral. No entanto, diante da substituição destas máquinas no mercado pelo computador, que oferece inúmeros recursos e vantagens perante as primeiras, os cursos de datilografia cederam lugar para os de informática. O conhecimento de datilografia antes exigido não se configura mais no panorama atual como fundamental. Nas repartições públicas e escritórios recentemente informatizados,

²⁰ ZYLBERSTAJN (1990)

ressoa ainda o barulho das máquinas de escrever daqueles que não conseguiram assimilar o avanço repentino da tecnologia na área de registros e processamento de dados. Nas conversas com os filhos, o apreço à desenvoltura dos mais jovens diante dos computadores não seria equivalente caso a escola continuasse a ensinar a utilizar as ultrapassadas máquinas de escrever.

Se quisermos esboçar um quadro também recente, com um fundo menos tecnicista e mais cognitivo, podemos refletir à respeito da incorporação do inglês como disciplina escolar. Apesar desta não ser a única língua estrangeira oferecida para o aluno, ainda assim é tida como a mais importante, tendo em vista as possibilidades de comunicação através deste idioma. Essa língua tem se disseminado tanto na sociedade, que já surgem defensores de um movimento patriótico de retorno à nossa língua materna em contraposição às apropriações cada vez crescentes de termos estrangeiros. Muitas “lojas de esquina”²¹ se utilizam do ‘s para denotar posse (Joãozinho’s Lanchonete, no lugar de Lanchonete do Joãozinho, por exemplo). Vários termos que antes eram de domínio exclusivo da informática, por exemplo, hoje são aplicados em outras atividades; é o caso de *deletar*, fazer um *upgrade* ou ainda *plugar*. No mundo de hoje, o inglês assume um papel tão importante na comunicação e/ou na busca de informações que se torna imperativo o tratamento deste na escola.

Neste exemplo ainda, podemos dizer que o ensino de inglês nas instituições escolares não visa apenas a compreensão dos termos presentes no cotidiano do aluno, mas principalmente, da estrutura da língua, das regras gramaticais, e ainda das diferenças existentes entre o inglês americano e o britânico, fruto de uma história política e cultural.

Assim também deve ocorrer na física escolar, uma reavaliação dos conteúdos a serem tratados ao longo do EM para que o novo e o antigo façam parte de uma estrutura que possibilite ao aluno compreender os conceitos e os processos da Física.

²¹ Utilizamos este termo para caracterizar as lojas de pequeno porte, em geral, microempresas.

I.2 - REVENDO A EDUCAÇÃO CIENTÍFICA

Na tentativa de buscar elementos que nos auxiliassem no alcance do objetivo maior deste trabalho – o de propor uma forma de inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio - percebemos que as insatisfações que foram expostas anteriormente e a justificativa defendida não são tão particulares a ponto de destoar das manifestações existentes a respeito do ensino de ciências, de forma que a pressão resultante dentro desse panorama promoveu a revisão da postura vigente frente ao Ensino Médio.

Os objetivos referentes à educação científica apontam para a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina, de tal forma que ao final do ensino médio o educando demonstre domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna. Para a concretização destes objetivos, a Resolução do CNE propõe que sejam considerados princípios estéticos, políticos e éticos, referindo-se respectivamente à sensibilidade, igualdade e identidade. Propõe ainda como diretrizes, a interdisciplinaridade e a contextualização.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais²², à respeito das resoluções tomadas pelo Conselho Nacional de Educação, aponta:

Tais referenciais já direcionam e organizam o aprendizado, no Ensino Médio, das Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, no sentido de se produzir um conhecimento efetivo, de significado próprio, não somente propedêutico. De certa forma, também organizam o aprendizado de suas disciplinas, ao manifestarem a busca de interdisciplinaridade e contextualização e ao detalharem... uma série de competências humanas relacionadas a conhecimentos matemáticos e científico-tecnológicos. Referenda-se uma visão do Ensino Médio de caráter amplo, de forma que os aspectos e conteúdos tecnológicos associados ao aprendizado científico... sejam parte essencial da

²² PCN do Ensino Médio, Parte III

*formação cidadã de sentido universal e não somente de sentido profissionalizante.*²³

Mais adiante, é colocado que o aprendizado deve contribuir não só para o conhecimento técnico, mas também para uma cultura mais ampla. A construção de compreensão dinâmica da nossa vivência material, de convívio harmônico com o mundo da informação, de entendimento histórico da vida social e produtiva, de percepção evolutiva da vida, do planeta e do cosmos devem ser buscados neste nível de ensino.

Enfim, deve-se tratar de um aprendizado com caráter prático e crítico e uma participação no romance da cultura científica, ingrediente essencial da aventura humana.

As diretrizes gerais contidas na LDB/96 para a reformulação da educação brasileira exige discussão e reflexão sobre o papel da escola e, em particular, dos pesquisadores em ensino de física, um aprofundamento dos significados de aprendizagem em ciências, em todos os níveis de ensino. Assim essa reformulação abre espaços para novas pesquisas na perspectiva de proposições e aplicações em sala de aula para esse novo momento.

EDUARDO TERRAZAN²⁴ realiza em sua tese de doutorado uma análise do panorama educacional atual²⁵ e aborda a necessidade de se inserir a física moderna no ensino médio.

Este pesquisador trata de esboçar alguns elementos para a redefinição do ensino, especificamente da Física, ainda que repercutindo o sentido geral do aprendizado. Acredita ele que, a vantagem deste repensar educacional é de questionar o sentido daquilo que a escola tem pretendido fazer, pelo fato de discutir os conteúdos mesmos de uma disciplina.

Durante sua tese, faz uma discussão a respeito da formação da cidadania e a importância da física escolar neste processo. Como pano de fundo, traça a grave situação atual do ensino médio ao caracterizar os alunos e os professores.

²³ Idem, p. 2

²⁴ TERRAZAN (1994)

²⁵ Apesar do panorama da educação nacional ter se modificado desde 1994, os pontos que ressaltaremos deste trabalho não sofreram mudanças significativa a ponto de invalidar nossa revisão.

Dentro da análise realizada, não poderia deixar de fora o estudo das iniciativas já tomadas no sentido de inserir conteúdos atualizados no ensino de física.

O que Terrazan propõe é uma ação pedagógica norteada pela imagem do conhecimento como uma teia tridimensional, uma rede de significações em contraposição ao panorama atual, baseado num encadeamento linear de conceitos, e estabelecido dentro de uma concepção empirista.

Negar a importância do aprendizado de relações significa deixar de dar significado aos conteúdos, na medida em que os objetos de conhecimento só podem ser apreendidos se forem percebidas e estabelecidas relações com outros objetos. A metáfora, a analogia e os modelos assumem, portanto, papéis fundamentais no tratamento das teorias físicas ao trazerem à tona a multiplicidade de vínculos entre um e outros conhecimentos, dando uma idéia de rede, teia de significações.

Uma pesquisa sobre a opinião de professores de física, pesquisadores em ensino de física e pesquisadores físicos, utilizando a técnica Delphi, por OSTERMANN²⁶, aponta os temas de Física contemporânea mais sugeridos para serem introduzidos no ensino médio, dentre os quais a Teoria da Relatividade Restrita se insere.

O objetivo dessa pesquisa era chegar a um consenso sobre tópicos de FMC que deveriam ser incluídos no currículo de Física do ensino médio em escolas brasileiras. A pesquisa completa envolveu três rodadas: Na primeira, os respondentes foram solicitados a sugerir tópicos de FMC que, em sua opinião, deveriam ser contemplados em uma atualização curricular de física no EM, sendo que as áreas mais sugeridas foram a Mecânica Quântica (63%), Relatividade Restrita (50%), Estado Sólido (40%) e Física das Partículas (38%); na segunda etapa, solicitou-se aos participantes um posicionamento frente aos tópicos sugeridos na primeira rodada, informando se concordavam ou não com o ensino destes²⁷; na terceira rodada houve possibilidade de revisar posições e atribuir grau de prioridade aos temas, de forma que 60,7% concordaram com a introdução da TRR enquanto 16,4% não opinaram e 23% discordaram.

²⁶ OSTERMANN (1998)

²⁷ Vale a pena ressaltar que a justificativa quanto ao posicionamento não foi requerida

Embora a listagem de temas enviada aos professores contemplasse alguns tópicos repetidos ou clássicos, acreditamos não comprometer na estrutura do trabalho e, portanto, dos resultados.

Quanto a artigos que envolvem a proposição de temas de FMC no EM contamos com algumas iniciativas nacionais relativamente recentes descritas a seguir.

A própria Fernanda Ostermann²⁸, descreve o processo de introdução de um tópico contemporâneo de Física – partículas elementares e interações fundamentais - em uma escola de Porto Alegre, a partir do estágio de um aluno de “Prática de Ensino de Física” do último semestre do curso de Licenciatura em Física da UFRGS. Ao apresentar justificativas para a escolha deste tópico, descreve o período de regência na escola, discute os resultados obtidos e, finalmente, conclui pela viabilidade de se atualizar o currículo de Física se o problema for atacado pela via da formação do professor.

COSTA & SANTOS²⁹ têm se dedicado à formação continuada de professores no estado do Rio de Janeiro como suposta superação do despreparo docente e escassez de material frente aos tópicos de FMC.

Tais autores, em parceria com professores do EM, sugerem a exploração de artefatos do cotidiano para que, a posteriori, pudessem ser desenvolvidos temas como laser, holografia, caos e fractais, relatividade e radiação. Estes têm realizado pesquisa bibliográfica, elaboração de textos e montagem de kits no intuito de aplicar este material junto a professores e alunos do EM.

CAVALCANTI³⁰ utiliza a mídia para apresentar o tema Raios Cósmicos através de um tratamento histórico da evolução das idéias e dos experimentos na física. CUSTÓDIO³¹ faz um levantamento, um estudo e elaboração de materiais didáticos associados à inserção da Física Quântica no ensino médio. Este autor aponta certas dificuldades presentes no ensino deste conteúdo, como o formalismo matemático, mas que pode ser “contornado” caso seja utilizado a História da Ciência, apontando para um estudo mais qualitativo e menos formal.

²⁸ OSTERMANN (1999)

²⁹ COSTA (1999a)

³⁰ CAVALCANTI (1999)

³¹ CUSTÓDIO (1999)

ARRUDA³² têm desenvolvido na UEL (Universidade Estadual de Londrina) um projeto conjunto entre professores do Departamento de Física e professores do EM, que visa a elaboração de propostas de inserção da FMC no currículo de física do Estado do Paraná. O projeto se originou de atividades do Pró-Ciências/97 e prevê seu término em 2000. Os participantes foram divididos em equipes, as quais desenvolvem aspectos diferenciados do programa.

Com relação a proposições internacionais, estas não são tão recentes se comparadas com as iniciativas brasileiras, no entanto, o número maior se refere a propostas direcionadas a fases iniciais de cursos universitários³³, e serão analisadas no Capítulo 4.

I. 3 - POR QUE A RELATIVIDADE ?

Vimos na seção anterior que o tratamento de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio se faz imperativo ! Sabemos também que a FMC comporta dois grandes blocos: a Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica. Neste trabalho optamos pela Teoria da Relatividade para ser inserida no Ensino Médio, mas.... por que ?

Primeiramente, a TR é considerada como um marco histórico³⁴ tanto no pensamento científico quanto para a sociedade em geral, principalmente depois da comprovação histórica da Relatividade Geral em 1919. Paty, a respeito deste episódio comenta que:

A fama mundial de Einstein começou naquele momento. E não foi só para o grande público, mas também no próprio meio científico... Quatro ou cinco anos depois da comprovação histórica, em 1919, a teoria da relatividade geral, bem como a restrita, estavam estabelecidas nas mentes dos cientistas, e a fama de Einstein para o público geral

³² ARRUDA & VILLANI (1998)

³³ Com relação aos artigos que envolvem a proposição de tópicos de FMC, resolvemos incluir os cursos universitários básicos pelo fato de ser a primeira vez que o aluno irá se deparar com esse assunto em sala de aula através de um ensino formal, tendo em vista a ausência deste conteúdo ainda no EM.

³⁴ BACHELARD (1996), p. 9. Nesta página, o autor separa em três grandes momentos a história da Física, dentre os quais a Relatividade é apontada como o marco de separação entre o segundo e o terceiro – o atual.

*confirmou a importância crescente dos novos rumos da física e os distúrbios daquele período crucial da história do mundo.*³⁵

Ainda segundo Paty³⁶, o fato dessa enorme difusão da Relatividade se deve em parte à mídia e ao traço mais marcante desta teoria, qual seja, o fato de tratar das leis da física do universo e da matéria além de reformular o espaço e o tempo, que pareciam tão comuns e naturais. Estes conceitos são completamente diferentes daqueles presentes na Física Clássica, tendo em vista que essas grandezas passam a depender do referencial. Segundo o próprio Einstein, a incompatibilidade existente entre a lei da propagação da luz e o princípio da relatividade na mecânica clássica foi resolvida pela Teoria da Relatividade através da negação de duas hipóteses clássicas:

- 1. O intervalo de tempo entre dois eventos independe do estado de movimento do corpo de referência.*
- 2. A distância espacial entre dois pontos de um corpo rígido independe do estado de movimento do corpo de referência.*³⁷

Com isso, todos os outros conceitos derivados como “evento” e “simultaneidade” passam a ser reformulados. As rupturas promovidas pela TR não são simples de serem compreendidas. Talvez por vivermos num mundo onde os efeitos relativísticos são desprezíveis - pois as velocidades a que nos submetemos são significativamente menores se comparadas com a velocidade da luz - c . A dificuldade de articulação dos seus postulados e das conseqüentes alterações nas interpretações dos fenômenos por alunos foi detectada e discutida por PIETROCOLA e ZYLBERSTAJN³⁸. Neste artigo, foram levantadas concepções de alunos universitários de Física sobre situações físicas relacionadas a TRR através de entrevistas.

³⁵ PATY (2000), p. 11

³⁶ idem

³⁷ EINSTEIN (1999), p. 31

³⁸ PIETROCOLA & ZYLBERSTAJN (1999)

“O resultado que mais surpreendeu nessa pesquisa foi a ausência de menção explícita ao Princípio de Relatividade nas respostas[dos alunos]. Não foi possível detectar em nenhuma delas argumentos relativísticos que explicassem a inexistência de mudanças nos fenômenos apresentados.”

Cabe ressaltar que dentre os alunos entrevistados, parte deles (em torno da metade) eram formandos do curso de Física, e portanto, já haviam cursado disciplinas que abordavam a Teoria da Relatividade Restrita, bem como outras que envolviam e utilizavam esse conteúdo.

Contrariamente a outros temas de FMC, a escolha da TR como tópico de inserção no EM entre diversos outros não pode residir no fato desse conteúdo permitir a compreensão de avanços tecnológicos que nos circundam. Enquanto a operacionalização da Física Quântica é muito mais evidente e muito mais presente para a compreensão de vários aparelhos, o único aparelho cujo funcionamento necessita da TRR para ser explicado é o GPS³⁹ e, mesmo assim, a contribuição dessa teoria se limita à correção que deve ser feita durante a transmissão do sinal entre o aparelho e o satélite. Como o sinal viaja na velocidade da luz e percorre um caminho relativamente longo, os efeitos relativísticos de contração do espaço e dilatação do tempo são significativos caso se queira uma localização precisa.

A inserção da TRR se funda basicamente em três aspectos: a mudança de padrão de raciocínio e interpretação da realidade aliada à abstração e sofisticação do pensamento, graças à concepção de tempo como uma quarta dimensão; a possibilidade dessa teoria servir de porta de entrada para outros tópicos da FMC e, finalmente, pela necessidade de abordagem de um tema tão presente na sociedade através da divulgação científica.

³⁹ GPS (Global Positioning System) é a abreviatura de NAVSTAR GPS (NAVSTAR GPS-NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System). É um sistema de radionavegação baseado em satélites desenvolvido e controlado pelo DOD (departamento de defesa dos Estados Unidos) que permite a qualquer utilizador saber a sua localização, velocidade e tempo, 24 horas por dia, sob quaisquer condições atmosféricas e em qualquer ponto do globo terrestre.

Primeiramente, só o fato desta teoria ser eminentemente uma teoria de princípio⁴⁰, já traz consigo alguns elementos importantes para que seja inserida no Ensino Médio.

Os princípios, na ciência, são para muitos os pontos de partida de uma dedução, mais formulado como interpretação, generalização e abstração de um saber anterior. Einstein⁴¹, por exemplo, mostra ser adepto desta idéia ao expor, em seu livro “Como Vejo o Mundo” sobre a prática científica e o nascimento de uma teoria. Segundo ele, os princípios na Física servem de base para todas as hipóteses, e a partir deles pode-se deduzir conseqüências. A prática dos cientistas poderia ser resumida em duas etapas cruciais: o primeiro de observação do mundo, dos fenômenos na busca de uma ordem comum, de uma generalização, de uma lei que seja válida no espectro de eventos conhecidos para que consiga alcançar os princípios gerais na natureza, concomitante à detecção, através dos grandes conjuntos de fatos experimentais, dos traços gerais e precisos que poderão ser explicitados nitidamente; quando essa formulação obtiver êxito, começa então o desenvolvimento das conseqüências, que muitas vezes revelam relações insuspeitadas que ultrapassam muito o campo dos fatos donde foram tirados os princípios. Mas, enquanto os princípios básicos para a dedução não forem descobertos, o teórico não tem absolutamente necessidade dos fatos individuais da experiência. Nem mesmo pode empreender qualquer coisa com as leis mais gerais, descobertas empiricamente. Deve antes confessar seu estado de impotência diante dos resultados elementares da pesquisa empírica até que se lhe manifestem princípios, utilizáveis como base de dedução lógica.

Os princípios da ciência, em uma certa etapa dada, são postos como proposições verdadeiras dentro de um sistema que eles organizam, sistema de fatos para as ciências do empírico. Mas esta “verdade” é de uma outra natureza que aquela das outras proposições de uma teoria, porque os princípios não são proposições verificáveis ou demonstráveis.

⁴⁰ Assim como Termodinâmica, a Teoria da Relatividade não tem base empírica, isto é, sua formulação não está sustentada em um fato ou uma experiência. Prova disto é que Einstein em seus livros, se utilizou basicamente de experiências de pensamento para propor e defender sua teoria. Além disso, as comprovações experimentais da Teoria da Relatividade só foram realizadas depois da sua proposição.

⁴¹ EINSTEIN (1998), p.141

Einstein separava as teorias da Física em dois tipos. As *teorias construtivas* que, segundo ele:

...tentam construir uma representação dos fenômenos complexos a partir de algumas proposições relativamente simples

Estas fazem modelos sobre constituintes fundamentais, como por exemplo, a teoria cinética dos gases. Por outro lado existem as *teorias de princípio*, nas quais:

...ponto de partida e fundamento não são constituintes hipotéticos mas propriedades gerais empiricamente observáveis dos fenômenos, princípios dos quais as fórmulas matemáticas são deduzidas tal que elas se aplicam a todo caso que se apresente.

Temos por exemplo desta categoria, a termodinâmica. Ainda segundo Einstein:

O mérito das teorias construtivas está em seu alcance, adaptabilidade e clareza; o das teorias de princípio em sua perfeição lógica e segurança de seus fundamentos⁴²

Será sobretudo preciso dizer que os princípios não revelam a categoria de verdade, mas a de validade entendida como sabida. Uma validade mínima significará que o conjunto de princípios de uma teoria não é incompatível, que suas conseqüências não se contradizem. Uma validade máxima significará que eles são fecundos dentro de um certo estado da ciência, que eles permitem enquadrar os objetos de uma teoria em uma unidade sistemática e prever conseqüências novas.

Durante a época em que a TR foi proposta, havia ocorrido uma série de problemas entre teorias clássicas e resultados experimentais. Algumas dessas incompatibilidades e discussões que destacam o desenrolar natural da ciência

⁴² EINSTEIN (1905), p. 54

enquanto atividade humana devem ser abordadas no Ensino Médio. Zanetic⁴³ aponta vários motivos que o levaram a defender a utilização da história da Física no ensino de Física, dentre os quais, a recuperação da física enquanto uma área do conhecimento que tem muito a contribuir na formação cultural geral de um cidadão contemporâneo por oferecer o aspecto dinâmico de uma área do conhecimento em evolução e/ou mudança; além de disponibilizar situações exemplares de rica utilização do imaginário, tão vital tanto para o cientista quanto para o cidadão contemporâneo.

GLEISER⁴⁴, no prefácio de seu livro destaca uma paixão que acreditamos fazer parte da prática científica e que deve ser mostrada e divulgada para nossos alunos e para todos os cidadãos. Diz ele:

Como espero mostrar, a física é muito mais do que a mera resolução de equações e interpretação de dados. Até arrisco dizer que existe poesia na física, que a física é uma expressão profundamente humana da nossa reverência à beleza da Natureza.

Aliado a esses fatores apontados por Zanetic, acreditamos que a exploração da história da física, em especial da Teoria da Relatividade possibilita a introdução de outros tópicos de FMC. A TR, neste sentido, serve de porta de entrada para ampliação do entendimento de fenômenos físicos (de clássicos para modernos).

Cabe neste momento ressaltar que ao nos referirmos à história da física, na verdade, estamos fazendo alusão não apenas aos processos internos dela, mas também aos externos, quais sejam a relação entre a ciência e outras áreas da sociedade. O desenvolvimento da física deve ser entendido como parte integrante da história social, é um produto da vida social, estando assim condicionada por uma imensa gama de fatores e interesses, que são modificados dependendo da época em que determinadas teorias e concepções sobre o mundo foram desenvolvidas.

⁴³ ZANETIC (1989), pp. 126/127

⁴⁴ GLEISER (1997) p. 13.

Além de todos estes fatores até agora expostos, apontamos também a influência exercida do ícone Einstein presente exaustivamente na mídia, no marketing, ou nos artigos de divulgação sobre sua vida, genialidade e teorias, no sentido de contribuir para a inserção de sua teoria no contexto da sala de aula, na medida em que os alunos já têm despertado o seu interesse no assunto.

O quadro instituído e descrito no momento em que o grande problema de nossa pesquisa foi exposto demonstra claramente a presença deste patrimônio cultural que é a figura de Einstein. Desde os primeiros momentos em que a TRR chegou ao Brasil, a ênfase dada ao personagem genial Einstein foi superior ao conteúdo propriamente dito de sua teoria revolucionária. Numa visita ao Brasil, o interesse pela TRR que antes era restrita a um pequeno grupo de acadêmicos, se estendeu pelo público em geral de forma que, entre 6 e 12 de maio de 1925 O Jornal e a Rádio Sociedade traziam notícias diariamente sobre o sábio e sua teoria.

Para ter uma idéia da recepção de Einstein pelo público extracientífico, basta citar sua conferência no Clube de Engenharia. A entrada foi franqueada e uma multidão lotou completamente a sala em que ocorreu a conferência, com pessoas comprimidas de tal modo que o próprio Einstein teve dificuldade para expor suas idéias. Muitos ficaram do lado de fora ou na calçada só para ver o sábio, embora os estudiosos sobre o assunto, portanto os que tinham possibilidade de entender suas explicações, dificilmente ultrapassassem meia dúzia⁴⁵

O fato do ícone Einstein e suas contribuições estarem presentes na vida do adolescente, ainda hoje, pode contribuir para a inserção da TRR no EM. Este assunto sim, está presente no cotidiano do aluno, em sua vivência diária. O tratamento dado a TR propicia uma série de questionamentos e discussões frente às informações que os próprios alunos trazem para a sala. Este talvez esteja na base do resultado obtido por OSTERMANN⁴⁶ onde a TRR aparece como sendo

⁴⁵ ALVES (1996), p. 126

⁴⁶ OSTERMANN (1998)

um dos tópicos da FMC mais indicados pelos professores consultados para ser inserido no EM.

CAPÍTULO 2

TEORIA DA RELATIVIDADE: HISTÓRIA, DIFUSÃO E RECEPTIVIDADE

Por cerca de 200 anos, predominaram na Física teorias que seguiam padrões de cientificidade forjados nos séculos XVII e XVIII. Tendo Isaac Newton como um dos personagens principais, a Física deste período ficou conhecida como Física Newtoniana, ou simplesmente Física Clássica. Foi Einstein, ao propor a Teoria da Relatividade Restrita, em 1905, quem abalou definitivamente o império newtoniano, ao criticar as noções até então aceitas de espaço e tempo. Com a Teoria Geral da Relatividade, encerrou para sempre o período clássico da Física.

A física newtoniana constitui-se de um longo período de crescimento contínuo. No decorrer desse processo, várias teorias foram propostas em diferentes domínios, como a Astrofísica, o Eletromagnetismo e as Teorias sobre o Calor. Todas estas teorias partilhavam os conceitos de base da concepção newtoniana. Entre eles destacavam-se os referenciais inerciais que estariam ligados à idéia de espaço absoluto.

A seguir discutiremos sobre algumas teorias e episódios que caracterizaram cada um destes dois períodos (pré e pós-einsteiniano), mostrando em particular alguns processos que permearam a comunidade científica durante a transição de um período para o outro, bem como os reflexos disso no meio social. Além disto pretendemos apontar algumas potencialidades que a TR possui no tocante às crenças culturais.

II.1 - A MECÂNICA DE NEWTON

A base de toda a teoria newtoniana é constituída de três princípios: da Inércia, Fundamental da Mecânica, e da Ação e Reação. Vejamos cada um dos pilares da teoria Newtoniana.

Segundo o Princípio de Inércia:

*Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele.*⁴⁷

Este princípio, embora pareça simples, possui implicações profundas para a interpretação dos fenômenos mecânicos. Vejamos algumas delas.

A primeira, e talvez a mais significativa, reside no questionamento e na resposta a este sobre a existência de um possível referencial absoluto, de tal forma que, a partir dele, poderíamos saber se um corpo se encontra em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. De forma textual, nos perguntamos: como poderemos saber se um corpo se encontra em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, se os movimentos relativos, os únicos acessíveis aos sentidos, referem-se a outros corpos?⁴⁸

Seria necessário, pois, adotar um referencial que pudesse ser considerado um “determinador” do movimento dos outros corpos. Este referencial era o Espaço Absoluto, assim definido por Newton nos Principia.

*O espaço absoluto, por sua natureza e sem qualquer relação com algo externo, permanece sempre semelhante e imóvel; o relativo é certa medida ou dimensão móvel desse espaço, a qual nossos sentidos definem por sua situação relativamente à terra.*⁴⁹

Para que isso fique mais claro, utilizaremos um exemplo: vamos supor que as estrelas fixas⁵⁰ fossem consideradas, a partir de agora, um referencial privilegiado. Dentre muitos outros, esse foi apontado como sendo o mais apropriado, pois as estrelas fixas estão praticamente “imóveis” no universo. Bem, tendo adotado um referencial, podemos tentar medir a velocidade de uma nave espacial em relação às estrelas fixas. No entanto, essa medição deve ser feita a

⁴⁷ NEWTON (1987), p. 136

⁴⁸ PIETROCOLA (1993)

⁴⁹ NEWTON (1987), p. 127

⁵⁰ As estrelas fixas são estrelas que se encontram muito distantes umas das outras de forma que o movimento relativo entre elas é praticamente nulo, isto é, as dimensões dos movimentos individuais são significativamente menores do que as dimensões da distância entre elas.

partir de algum experimento realizado dentro da nave, sem informação alguma do exterior ou, melhor dizendo, a espaçonave não deve possuir janelas.

Sendo assim, após atingirmos o espaço sideral, poderemos desligar os motores e permanecer com velocidade constante (considerando que o espaço seja um vácuo). Atingido este estágio, devemos utilizar algum aparelho ou algum experimento que revele a velocidade do foguete em relação às estrelas fixas. O problema é que nenhum dos experimentos mecânicos, poderá revelar a “velocidade absoluta” da nave, uma vez que as leis mecânicas produzidas a partir dos três princípios de Newton dependem apenas de aceleração, velocidade e posições relativas. Qualquer bola que for arremessada seguirá uma linha reta, seja em que direção for. Os objetos que estavam imóveis sobre a mesa quando o segundo estágio da nave foi atingido, permanecerão neste estado. Ou seja, estar em repouso ou com uma velocidade constante qualquer⁵¹ não faz diferença⁵².

Só saberemos nosso estado de movimento quando algo atingir a nave ou algum propulsor for ligado, pois uma força externa estará agindo sobre o sistema⁵³, resultando no aparecimento de forças fictícias⁵⁴. Neste caso o nosso estado de movimento será acelerado, isto é, perceberemos e poderemos medir a variação da velocidade da nave.

Portanto, no caso da nave atingir (ou ser atingida) por um meteorito, todos os objetos pertencentes ao módulo iriam “sentir” um impulso na mesma direção, porém em sentido contrário ao do impacto. Assim, se o meteorito se chocar com a parte frontal da nave, nosso material de laboratório será arremessado para a parte da frente da nave. Essa perturbação que ocorrerá no interior do módulo será a evidência de que a nave está sofrendo uma aceleração.

Para Newton, este era o motivo pelo qual o Espaço Absoluto não seria acessível à percepção, sendo impossível determinar um corpo em estado de repouso absoluto.

Antevendo críticas a respeito da impossível detecção deste referencial, Newton tentou fornecer evidências da sua existência. Para ele, os efeitos

⁵¹ O valor da velocidade da nave é indiferente, pois ela pode ter valores desde zero até infinito.

⁵² Esta idéia foi expressa por Galileu algumas décadas antes de Newton, e nomeada posteriormente de Princípio de Relatividade Galileana.

⁵³ No caso dos propulsores, estes estão sendo considerados como sendo externos ao módulo onde se encontra o piloto. Por isso a força neste caso é considerada externa

⁵⁴ ZYLBERSTAJN (1989) ?

produzidos em corpos acelerados, como no exemplo do balde com água em rotação⁵⁵, seriam manifestações da existência de movimentos absolutos, indicando situações que permitiriam a diferenciação entre os movimentos de rotação verdadeiros e aqueles causados simplesmente pelo movimento relativo a corpos móveis tidos como referencial. Neste caso, o formato assumido pela água dentro do balde seria a evidência da rotação deste.

A relação que existe entre força externa e a aceleração que esta provoca no corpo é dada pelo Segundo Princípio de Newton:

*A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa, e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força.*⁵⁶

Ou, ainda considerando a massa como uma grandeza constante, a velocidade adquirida por um corpo que sofre a ação de uma força resultante é maior quanto maior for o módulo da última. Em contrapartida, a aceleração deste corpo será maior quanto menor for o valor de sua massa. Equacionando as proporções, temos:

$$\Sigma F = F_{res} = m.a$$

Imaginemos uma situação na qual, dormindo no foguete, de repente acordássemos com os controles dos aparelhos propulsores da nave quebrados. Através de uma comunicação com a base na Terra, descobrimos, então, que uma segunda nave espacial esta retornando para a Terra e que, dentro de 1 hora, ela estará a uma distância suficiente para que o tele-transporte seja utilizado, possibilitando que nós peguemos uma “carona”. Uma hora depois, o sucesso do tele-transporte nos garantiu a passagem de volta para casa.

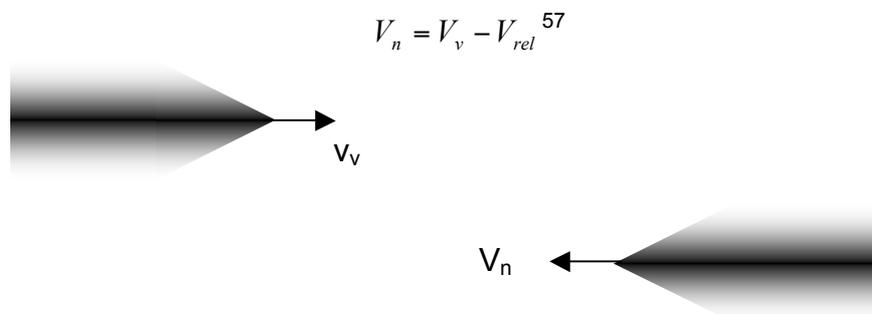
Com certeza, nós nunca descobriremos se esta espaçonave estava parada ou em MRU, pois as diferenças entre ela e a nossa nave podem ser muitas,

⁵⁵ A água dentro de um balde altera a forma de sua superfície quando este é girado, pois se encontra acelerado em relação ao espaço absoluto. Assim, não podemos saber se estamos em movimento retilíneo e uniforme ou parados em relação ao espaço absoluto, mas conseguimos detectar se estamos acelerados. A prova de que o Espaço Absoluto existe reside portanto, nas evidências dos movimentos acelerados.

⁵⁶ NEWTON (1987), p. 136

desde o combustível utilizado até o design, os instrumentos, enfim, tudo; a não ser por um detalhe: o estado de movimento. Isso quer dizer que, desde que a velocidade seja constante, os Princípios de Newton deveriam continuar válidos. Nos questionamos então sobre a invariância do segundo princípio de Newton quanto à velocidade do sistema. Será que, mesmo estando com uma velocidade supostamente diferente da que tínhamos na nossa espaçonave, a Lei de Newton ainda continua válida? Vejamos o que muda ao passarmos de um referencial (nossa espaçonave) para outro:

Sendo V_n a velocidade da nova nave em relação às estrelas fixas, V_v a velocidade da nossa espaçonave quebrada em relação às estrelas fixas e V_{rel} a velocidade da nova nave em relação à quebrada, podemos afirmar que:

$$V_n = V_v - V_{rel}^{57}$$


Supondo que $V_v = 100$ m/s e $V_{rel} = 500$ m/s, temos que:

$$V_n = 100 - 500 = -400 \text{ m/s}$$

Apesar da diferença nos valores antigo e novo da minha velocidade, a Segunda Lei de Newton continua sendo válida para os dois casos,

$$F = m.a = m \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

A força resultante é proporcional à variação de velocidade e não à velocidade em si:

⁵⁷ Este é um caso particular das Transformações de Galileu para os movimentos unidimensionais. Optamos por esta restrição pelo fato disso não afetar a discussão, o mesmo ocorreria se apresentássemos o caso mais geral, isto é, o movimento em três dimensões. Pensamos aqui apenas no movimento de ida e volta dos foguetes.

$$F_v = m \cdot \frac{100 - 100}{\Delta t} = zero$$

$$F_n = m \cdot \frac{-400 - (-400)}{\Delta t} = zero$$

É importante perceber que, se sentíssemos algo de diferente, seria no momento do tele-transporte, dependendo da forma com que ele for realizado; caso contrário, nenhuma mudança seria percebida.

Essa teoria demonstrava, portanto, um poder enorme diante dos fenômenos estudados naquela época. Esse poder se estende ainda a grande parte dos fenômenos conhecidos hoje, pelo menos os referentes à mecânica.

II.2 – O ÉTER E AS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Até meados do século XIX, vários fenômenos novos foram estudados, de forma que os eletromagnéticos ainda não possuíam um corpo teórico tão estável quanto o mecanicismo da época de Newton. Maxwell chegou a formular as Leis de Maxwell, que descreviam com grande rigor os fenômenos eletromagnéticos, desde que estes se dessem num referencial estacionário.

Em relação aos fenômenos óticos, a luz até então era concebida como um ente de natureza ondulatória e sem qualquer relação com os fenômenos eletromagnéticos. Várias perguntas eram ainda um mistério para a ciência daquela época em relação à luz, como por exemplo, a existência de um meio através do qual a luz se propagaria. Sabia-se já naquela época que as ondas mecânicas precisavam de um meio material para se propagar, isto é, uma campainha que toque num recipiente vazio⁵⁸ não será escutada, pelo fato do som não poder se propagar no vácuo. No entanto, a luz conseguia atravessar o espaço “vazio” que existe entre o Sol e a Terra. Qual seria então o meio de propagação dessa onda ?

No intuito de responder a esse questionamento, Maxwell buscou a unificação desses dois domínios da física, até então distintos: a ótica e o eletromagnetismo. Segundo Lorentz, existia um meio através do qual a luz se

⁵⁸ Pode-se produzir um semi-vácuo num recipiente de vidro, por exemplo, utilizando-se uma bomba de vácuo. Dessa forma, o ar que estaria dentro do recipiente seria extraído, eliminando o meio material que seria responsável pela propagação do som.

propagaria: o éter. Para que este meio satisfizesse todas as condições de contorno dos fenômenos óticos, ele deveria possuir determinadas propriedades. Esse fluido deveria ser imponderável, infinito, homogêneo, isotrópico e, principalmente, não sujeito a acelerações; caso contrário, não seria possível explicar a regularidade observada com relação à posição das estrelas obtidas nas observações.

O éter deveria ser infinito, pois ocupava todo o universo, e homogêneo, para que nenhuma parte do universo fosse diferente do resto, pois isso alteraria o comportamento da luz naquelas localidades diferenciadas. Além disso, como observamos que a luz se propaga da mesma forma, independente da direção por ela tomada, este meio deveria ser também isotrópico.

Segundo a Teoria de Lorentz⁵⁹:

O mundo físico consiste de três coisas separadas, três tipos de materiais fundamentais: primeiro, a matéria ordinária tangível; segundo, os elétrons; terceiro o éter...

Em relação ao éter – o suporte da luz que preenche o universo inteiro - ... desde que temos aprendido a considerá-lo como transmissor não só dos fenômenos óticos, mas também dos eletromagnéticos, o problema da sua natureza tornou-se mais premente do que nunca...

... A explicação mais simples do fenômeno (da aberração da luz)⁶⁰ consiste em assumir que a Terra inteira é completamente permeável ao éter e que pode se movimentar através dele sem arrastá-lo...

Graças às investigações de Vander-Walls e de outros físicos, fomos forçados a pensar que cada molécula individual também é permeável (ao éter)... e o mesmo parece verdadeiro para cada átomo; isso nos conduz a avançar a idéia de que um átomo, em última instância, consiste em algum tipo de modificação local do éter onipresente, modificação que pode se deslocar de um local ao outro sem que o próprio meio altere sua posição...

⁵⁹ LORENTZ (1902), pp. 15, 19 e 20.

⁶⁰ PIETROCOLA (1993).

Essas duas últimas características do éter são importantíssimas, pois denotam propriedades diferentes das encontradas até então na natureza: ele não poderia oferecer resistência alguma para os corpos físicos (viscosidade baixa) e ao mesmo tempo deveria ser rígido o suficiente para propagar as oscilações das ondas eletromagnéticas.

Com a finalidade de teorizar a respeito dos fenômenos eletromagnéticos e óticos, Lorentz fundou sua teoria sobre alguns outros pilares além dos já citados anteriormente. O primeiro é o fato de que o éter interagia apenas eletromagneticamente com a matéria ponderável. Ele deveria penetrar a matéria e, então, no interior dela se dariam os fenômenos eletromagnéticos. No entanto, o éter não acompanharia o movimento da matéria, de forma que a velocidade da luz, no vácuo, se tornaria independente do estado de movimento da fonte.

O segundo era justamente a relação entre éter e cargas. Segundo Lorentz, os elétrons deveriam ser permeáveis ao éter; cada um deles deveria ser o centro do campo elétrico e, quando em movimento, também do campo magnético.

A força que agia num elétron teria sua origem no éter que se encontrava na sua vizinhança imediata e, portanto, seria afetado diretamente pelo estado deste éter e indiretamente pelas cargas e velocidades dos outros elétrons; mais ainda: a força dependeria da carga e da velocidade da partícula sobre a qual está agindo.

Através dessa teoria, Lorentz conseguiu explicar os fenômenos óticos e eletromagnéticos, até então não relacionados. Diante dessa unificação, se fez necessário atentar para um questionamento importantíssimo: qual seria a velocidade da Terra em relação ao éter? Afinal de contas, o éter assumia na Teoria de Lorentz um papel similar ao que o Espaço Absoluto representava na Teoria Newtoniana. Existia, no entanto, uma diferença primordial entre esses dois referenciais privilegiados: a de que o Espaço Absoluto era indetectável para Newton, na medida em que todos os fenômenos mecânicos se davam da mesma forma em referenciais inerciais, enquanto o éter, a princípio, poderia ser detectado através de fenômenos óticos ou eletromagnéticos.

A possibilidade de detecção se baseava no fato de que as Leis do Eletromagnetismo de Lorentz dependiam de velocidades e posições em relação ao éter. Sendo a luz uma onda, a descrição do seu movimento envolvia grandezas como a velocidade de propagação, o período ou a frequência, e a

intensidade ou amplitude das mesmas, sendo que estas estavam diretamente ligadas ao estado de movimento do objeto utilizado como referência.

Podemos, assim, dizer que o éter assumia um papel similar ao do espaço absoluto na teoria newtoniana, na medida em que o estado de movimento dos corpos era definido a partir deste referencial singular, privilegiado.

No entanto, Newton admitia a impossibilidade de detecção deste referencial, uma vez que, pelo Princípio de Relatividade, os fenômenos mecânicos se dariam da mesma forma independentemente da velocidade do móvel, desde que esta fosse constante. Já a teoria de Lorentz admitia inicialmente essa possibilidade. Indo um pouco mais além, a velocidade da Terra em relação ao éter, por exemplo, não era apenas possível de ser detectada, mas se fazia imperativo conhecê-la.

O valor da velocidade da Terra em relação ao éter na descrição dos fenômenos luminosos se tornou importante e detectável⁶¹, uma vez que a ótica ondulatória do século passado dependia da velocidade de propagação da onda em relação ao meio. A Terra, a princípio, não só está em movimento, como também este movimento deve mudar ao longo do ano. Estes diferentes estados de movimento devem interferir, por exemplo, num mesmo experimento, caso este seja realizado em diferentes épocas do ano.

Com o intuito de verificar tais desdobramentos, vários fenômenos foram propostos e/ou observados e analisados. Arago⁶² em 1810, por exemplo, pretendia provar a composição do movimento terrestre com a propagação da luz. Num primeiro momento, mediu-se o ângulo de refração num prisma onde a luz incidente provinha de uma estrela em direção à qual a Terra se movia, e penetrava perpendicularmente na sua superfície. Depois, realizava-se uma outra medição, utilizando a luz de uma estrela posicionada no sentido oposto. Como o desvio da luz ocasionado pela sua passagem através do prisma dependia da velocidade da luz em relação ao prisma, Arago previa uma variação na trajetória luminosa ao comparar as duas medições obtidas.

Mas o experimento não forneceu nenhuma variação angular dos raios refratados.

⁶¹ PIETROCOLA (1993)

⁶² idem, p. 172

Além desse experimento, outros foram propostos e realizados com o intuito de determinar os movimentos absolutos em relação ao éter, que, por ser um referencial privilegiado, deveria acabar com o círculo vicioso de auto-definições entre a lei da inércia e o movimento inercial⁶³. No entanto, nenhum deles obteve sucesso no tocante à detecção da velocidade da Terra em relação ao éter.

As interpretações sobre os resultados negativos eram muitas e iam sendo introduzidas à medida que novos experimentos eram feitos.

O experimento de Michelson-Morley, de 1887, é um dos exemplos que mais intrigou a comunidade científica com seus resultados. Depois de passar por aprimoramentos, o experimento do interferômetro de grande precisão deveria revelar a velocidade da Terra em relação ao éter na segunda ordem de v/c .

A Teoria de Lorentz que já havia sofrido várias modificações para se tornar compatível com os resultados dos experimentos nos quais não podia ser evidenciado o movimento da Terra em relação ao éter, pelo menos até a primeira ordem de v/c ⁶⁴, agora propõe a inserção dos estados correspondentes, que englobam a contração das distâncias e o tempo local.

Detalhando melhor a teoria dos estados correspondentes, segundo Lorentz, para que as equações de Maxwell ficassem invariantes com relação à velocidade, isto é, para que as Leis de Maxwell continuassem válidas independente do estado de movimento do observador (parado ou em movimento retilíneo e uniforme), os dois sistemas deveriam obedecer a uma transformação, na qual a distância sofreria uma contração.

Em outras palavras, Lorentz mostrou que, entre as coordenadas de um sistema S_1 de cargas em equilíbrio e em repouso no éter e as coordenadas do sistema S_2 com as mesmas cargas em equilíbrio e em movimento com velocidade v no éter existe a relação:

$$X_2 = X_1 \left[1 - \frac{v^2}{c^2} \right]^{\frac{1}{2}}, y_2 = y_1, z_2 = z_1,$$

se a velocidade de S_2 fosse na direção de x .

⁶³ PIETROCOLA (1993)

⁶⁴ v/c relaciona a velocidade do corpo, no caso a Terra, com a velocidade da luz(c).

De acordo com a equação acima descrita, para qualquer velocidade do sistema S_2 diferente de zero em relação ao sistema S_1 , o termo entre colchetes será menor que 1; sendo assim, existe uma relação de contração entre as distâncias de S_2 em relação a S_1 .

Além da contração das distâncias, o tempo no referencial S_2 deveria ser diferente do tempo transcorrido no referencial S_1 . A relação entre essas grandezas se dava de forma contrária ao que ocorria com o espaço, pois enquanto o espaço se contraía – diminuía -, o tempo dilatava. Este tempo dilatado foi chamado por Lorentz de tempo local.

A versão final da Teoria de Lorentz apareceu em 1904 com a versão definitiva das equações de transformação – relativas aos estados correspondentes – junto com uma proposta sobre a forma e a estrutura do elétron: a idéia fundamental é que a contração das distâncias e a dilatação dos tempos, junto com suas conseqüências, não permitiam detectar experimentalmente os efeitos do movimento da Terra em relação ao éter, na medida em que os instrumentos de medida são afetados diretamente. O que temos então, é uma impossibilidade experimental de detecção !!!

II.3 - AS TEORIAS DA RELATIVIDADE

No início do século XX, mais precisamente em 1905, um ano após a proposição final da Teoria de Lorentz, diante do panorama de conflitos e alterações de teorias, Albert Einstein propõe uma “nova” teoria: a Teoria da Relatividade Restrita.

As possíveis relações entre a Teoria de Lorentz e a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) são analisadas por vários historiadores e pesquisadores, dentre os quais destacaremos Whittaker⁶⁵ e Pauli⁶⁶, que defendem a continuidade entre os trabalhos de Einstein, Lorentz e Poincaré. Em contrapartida, Gerald Holton⁶⁷ refuta a opinião destes pesquisadores ao defender o carácter revolucionário da TRR.

⁶⁵ WHITTAKER (1953)

⁶⁶ PAULI (1962)

⁶⁷ HOLTON (1973)

Pauli, mesmo reconhecendo a originalidade da perspectiva de Einstein, opina a favor da continuidade entre os trabalhos de Lorentz, Poincaré e a Teoria de Einstein. Isso fica explícito no seguinte trecho:

Einstein e Poincaré basearam-se nos trabalhos de Lorentz que (...) tinha-se aproximado do resultado sem atingi-lo completamente. Na coincidência dos resultados conseguidos, por caminhos diferentes, por Einstein e Poincaré, eu vejo o profundo significado da harmonia entre os métodos matemáticos e a análise dos aspectos gerais da experiência física, conduzida com experimentos ideais..⁶⁸

As críticas apontadas por Holton e Battimelli⁶⁹ em relação às teorias expostas por Pauli e Wittaker se fundamentam em alguns pontos cruciais. O primeiro deles diz respeito ao limite das velocidades. Na conferência de 1904, Poincaré afirma que os experimentos pareciam teimar em sugerir a impossibilidade de detectar o movimento absoluto e que o caminho a ser tomado seria a construção de uma nova mecânica, com a velocidade da luz como limite não ultrapassável, o que é muito diferente de enunciar um novo princípio de Relatividade. A ligação entre princípio de Relatividade e velocidade limite deve ser creditada à TRR, na medida em que, na teoria exposta por Poincaré e Lorentz, trata-se de duas propriedades físicas completamente distintas.

O segundo ponto crucial defendido por esses historiadores é o de que a Teoria de Lorentz e Poincaré é, na verdade, uma teoria do éter e do elétron, e não uma teoria da Relatividade. Como vimos anteriormente, para eles a impossibilidade de detecção do movimento da Terra em relação ao éter era uma limitação experimental, e não implicava na eliminação do éter.

Um terceiro ponto importante e que deve ser enfatizado é o fato de que Einstein não conhecia o trabalho de Lorentz, que foi publicado em 1904⁷⁰. As equações de transformação são assumidas a priori por Lorentz ao formular a teoria dos estados correspondentes, enquanto Einstein as deduziu a partir dos dois postulados da Relatividade.

⁶⁸ PAULI (1962), p. 88

⁶⁹ BATTIMELLI (1973)

⁷⁰ LORENTZ (1904).

Gerald Holton vai além, ao defender a idéia de que a Teoria de Lorentz é inferior à de Einstein por dois motivos: por um lado, a menor consistência do ponto de vista matemático e, por outro, a maior utilização de hipóteses ou suposições.

Sobre a Teoria de Lorentz, Holton, comenta que:

A explicação até então corrente dos resultados dos experimentos de Michelson em termos de contração comprometia ulteriormente a teoria eletrodinâmica baseada no éter, que Einstein já considerava inadequada por razões principalmente estéticas. O problema que Einstein via não era o status lógico da hipótese da contração nem o próprio resultado experimental de Michelson (pois poderia ser acomodado, mesmo com ulteriores dificuldades), mas a incapacidade da teoria de Lorentz de satisfazer o critério de perfeição interna de uma teoria...⁷¹

As discussões são inúmeras e os argumentos em prol de cada posição também. No entanto, um fato é comum a todos: embora ambas as teorias conseguissem explicar os fenômenos observados na época, os caminhos tomados para tal são substancialmente diferentes.

Enquanto Einstein parte de dois princípios gerais e chega às Transformações de Lorentz (idênticas às equações dos estados correspondentes de Lorentz) para mostrar a equivalência entre os referenciais inerciais, Lorentz parte de resultados experimentais para modificar sua teoria e chegar aos estados correspondentes.

Se para Einstein o fato da velocidade da luz ter sempre o mesmo valor para qualquer referencial inercial é um Princípio, para Lorentz esse fato se deve às alterações ocorridas nos instrumentos de medida decorrentes do movimento existente em relação ao éter, e que são expressas através da teoria dos estados correspondentes, ou seja, trata-se de uma conseqüência.

Einstein demonstra em sua vida e obra o apreço pela coerência e simplicidade lógica da física e de suas leis ao descrever os processos naturais, a busca

⁷¹ PAULI (1962) pp. 315/316

incessante pelos princípios que regem os fenômenos. Para Einstein uma teoria deveria ser julgada segundo a sua perfeição interna e segundo a sua confirmação experimental. Isso não significa que a teoria deve ser construída sobre fatos empíricos, nem verificada através de experimentos decisivos, mas simplesmente que ela não deve contrastar com fatos empíricos.

Einstein, desde os 16 anos de idade já refletia sobre questões relacionadas com princípios físicos. Ele já tinha a idéia da quebra do princípio da relatividade quando foi afirmado que, caso nos movêssemos com a velocidade da luz, paralelamente a um feixe, poderíamos visualizar sua crista! Para ele, a luz era um fenômeno por si só e, portanto, não deveria se apresentar de formas diferentes somente pela mudança na velocidade do observador. O paradoxo é assim enunciado em suas “Notas Autobiográficas”:

Se eu persigo um raio de luz com velocidade c , eu deveria observar esse raio de luz como um campo eletromagnético oscilatório em repouso. Entretanto, parece que não há tal coisa, seja com base na experiência ou de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início pareceu-me intuitivamente claro que, do ponto de vista desse observador, tudo teria de acontecer de acordo com as mesmas leis válidas para um observador que estivesse em repouso em relação à Terra. Pois como poderia o primeiro observador saber, ou seja, ser capaz de determinar que ele está em movimento uniforme rápido ?⁷²

A questão central desse paradoxo se refere à possibilidade de detecção do estado de movimento do observador utilizando-se de fenômenos eletromagnéticos. Na mecânica isso seria impossível, como vimos anteriormente, mas pela teoria que concebe o eletromagnetismo como oscilações no éter seria perfeitamente possível⁷³.

Uma segunda assimetria que levou Einstein a formular a TRR foi a interpretação do movimento relativo entre um ímã e um condutor. Se considerarmos um ímã e um condutor em movimento relativo, pela teoria

⁷² EINSTEIN (1959), p. 53

⁷³ Essa reflexão se deu antes da formulação final da Teoria de Lorentz. Foi a partir desse tipo de assimetria que experimentos como o de Arago e Michel-Morley foram formulados.

eletromagnética do final do século XIX havia duas explicações distintas. Primeiramente, se o ímã estivesse em repouso em relação ao éter e o condutor se movimentasse para a esquerda com uma velocidade v , então, cada carga q do condutor experimentará uma força eletromagnética dada por $F = \frac{q}{c} v \times B$ que produzirá corrente elétrica. Por outro lado, se o condutor estivesse fixo em relação ao éter e o ímã se movimentasse com a mesma velocidade v da situação anterior só que para a direita, um observador parado em relação ao condutor descreveria a situação de outra forma. Em cada ponto do espaço o campo magnético B variaria uniformemente com o tempo. Pela lei de Faraday, é criado um campo elétrico E no espaço ao redor do ímã que, através da Força de Lorentz $F = q(E + \frac{1}{c} v \times B)$, exercerá uma força igual a $F = qE$ sobre cada carga do condutor, dando origem a uma corrente elétrica de mesma intensidade e comportamento que no primeiro caso. Logo, se no primeiro caso a corrente elétrica é fruto da atuação de um campo magnético, no segundo é produzida por um campo elétrico.

Einstein notou que existia uma inconsistência nessas situações, na medida em que as duas situações são indistinguíveis experimentalmente mas são distintas do ponto de vista teórico !

Essas duas reflexões aliadas às inúmeras tentativas de detecção do movimento da Terra no éter levaram Einstein a formular a TRR, cujos princípios são enunciados abaixo:

Se K' é um sistema de coordenadas que efetua um movimento uniforme e sem rotação em relação a K , os fenômenos da natureza que se desenrolam em relação a K' obedecem exatamente às mesmas leis que em relação a K . Chamamos este enunciado de “princípio da relatividade”.

(...)Em qualquer referencial inercial a velocidade da luz, c , é sempre a mesma, seja emitida por um corpo em repouso ou por um corpo em movimento uniforme⁷⁴

⁷⁴ Einstein (1905)

Einstein, a respeito do seu primeiro postulado comenta:

...caso não fosse válido o princípio da relatividade, seria de se esperar que a direção momentânea do movimento da Terra fosse incluída nas leis da natureza; portanto, o comportamento dos sistemas físicos dependeria de sua orientação espacial em relação à Terra⁷⁵

Einstein, apesar de alterar a base das Leis de Maxwell - quando não admite a existência do éter - e as Leis de Newton - restringindo-as a um limite de velocidade - promoveu a harmonia entre essas duas teorias; tendo em vista que o princípio da relatividade deveria ser o mesmo para as duas teorias:

... é pouquíssimo provável que um princípio de tão grande generalidade, que se aplica com tamanha exatidão a um tipo de fenômeno, venha a falhar em um outro domínio⁷⁶

No entanto, mesmo depois do advento da TRR, Lorentz continuou desenvolvendo seus trabalhos fundamentados no éter.

A partir de então, a TRR, foi difundida pela comunidade, mas encontrando uma resistência à sua aceitação não somente por parte de Lorentz, mas também dos adeptos do éter⁷⁷.

Depois da TRR, logo em 1906 Einstein publicou seu trabalho sobre a relação massa-energia, mas percorreria ainda um longo percurso até a publicação da Teoria da Relatividade Geral, em 1915.

De 1906 a 1912, aproximadamente, Einstein buscou uma teoria para referenciais acelerados, tentando trilhar o mesmo caminho percorrido ao longo da formulação da TRR, isto é, partindo de princípios e chegando em formulações de equações. Para tanto, revisou a gravitação rumo à sua compatibilização com o quadro relativístico. O primeiro passo desta revisão veio da análise da relação massa-energia aplicada à radiação: se a radiação era um pacote de energia e a

⁷⁵ EINSTEIN (1999), p. 21

⁷⁶ Idem p. 20

⁷⁷ Este assunto será tratado no próximo tópico deste capítulo

energia tinha relação com a massa, então ela deveria estar sujeita à gravitação. Logo, os modelos que desvinculassem a radiação da gravitação deveriam ser refutados.

Em seguida, Einstein analisou a simultaneidade relativística aplicada à gravitação, isto é, a atuação da gravitação de um corpo sobre outro deveria se propagar com uma velocidade finita, de forma que a ação não seria mais instantânea, como se pensava. A idéia de campo, portanto, deveria ser aplicada a essa situação.

A terceira reflexão realizada se refere justamente à equivalência entre massa inercial e gravitacional. Se pensarmos em um corpo qualquer que cai num campo gravitacional (e no vácuo) e compararmos com outro que também partiu do repouso ou com a mesma velocidade que o primeiro, então, de acordo com a Segunda Lei de Newton:

$$\text{Força} = \text{massa inercial} \times \text{aceleração},$$

onde a “massa inercial” é uma constante característica do corpo acelerado. Por outro lado, se a força aceleradora é a gravidade, temos:

$$\text{Força} = \text{massa gravitacional} \times \text{intensidade do campo gravitacional},$$

onde a “massa gravitacional” também é uma constante característica do corpo. Destas duas relações segue-se que:

$$\text{Aceleração} = (\text{massa gravitacional} / \text{massa inercial}) \times \text{int. do campo gravitacional}$$

No entanto, vimos que, para um dado campo gravitacional, a aceleração deve ser sempre a mesma, independentemente da natureza e do estado do corpo; então a relação entre massa gravitacional e inercial também deve ser a mesma para todos os corpos.

O Princípio de Equivalência de alguma maneira estendia o Princípio da Relatividade a referenciais não inerciais: todos os corpos se comportam em um

campo gravitacional homogêneo de tal forma que este campo é fisicamente equivalente a um sistema de referência acelerado.

No entanto, a partir de 1912, Einstein acabou optando pelo aprofundamento do instrumental matemático para que pudesse então formular sua teoria de forma geral.⁷⁸

II.3.1 - CONSEQÜÊNCIAS FÍSICAS DA RELATIVIDADE

A Teoria da Relatividade, tanto a Restrita quanto a Geral, possui implicações muito interessantes de serem tratadas do ponto de vista conceitual. O fato dessa teoria ser de Princípio permite realizarmos alguns questionamentos, indagações que só podem ser respondidas de forma clara quando se tem real domínio dos conceitos e princípios físicos envolvidos nos problemas.

Ao invés de tratarmos esses questionamentos na forma de tópicos e perguntas, narraremos uma viagem de trem que ocorrerá num mundo imaginário onde a velocidade da luz não ultrapassa os 40 Km/h. Dessa forma, os efeitos relativísticos estarão presentes na maior parte dos acontecimentos.

Antes de embarcar no trem, o nosso passageiro Isaac Einstein se despede de seu irmão gêmeo, Albert Newton, que ficará na cidade de origem cuidando dos negócios referentes à empresa que os dois haviam montado. Após todas as recomendações, Isaac Einstein se senta na confortável poltrona da cabine e acena para o irmão. À medida em que o trem vai partindo, Isaac percebe que seu irmão está se tornando cada vez mais magro, embora continue da mesma altura. O mesmo ocorre com toda a estação, que rapidamente se encurta ao longo da horizontal. Este efeito é fruto da velocidade do trem e, embora pareça espantoso para nós, Isaac o encara com a maior naturalidade, uma vez que passa por esse tipo de situação toda vez que sai de casa e vai para o trabalho, montado em sua bicicleta.

O nosso personagem está tranqüilo na viagem, tirando uma soneca, quando de repente acorda assustado: pensa ter esquecido sua carteira. Corre então ao longo do corredor em busca de sua bagagem que se encontra numa cabine

⁷⁸ No tópico a seguir trataremos mais especificamente das contribuições de Minkowski, matemático, na formulação da Teoria da Relatividade Geral.

próxima à do maquinista. A velocidade com que correu foi tão grande (30km/h) que teve a impressão de ter rompido a barreira da velocidade da luz, pois o trem já se deslocava com a velocidade de cruzeiro, que também corresponde a 30Km/h. Ao checar sua bagagem percebe que seu susto não correspondia à realidade..... ufa !!!

Retorna então à sua poltrona a fim de continuar sua soneca gostosa mas, depois daquele susto, a adrenalina se encarregou de mantê-lo aceso. Resolveu então calcular, em relação aos trilhos, a velocidade com que havia se deslocado, para verificar se havia realmente ultrapassado a velocidade da luz. Seu primeiro impulso foi somar a sua velocidade com a do trem - isto é, 30 + 30 Km/h - para encontrar sua velocidade em relação ao solo, chegando num resultado igual a 60 Km/h, o que representa 1,5 vezes a velocidade da luz. No entanto, recordou-se de que este não era o cálculo correto, pois deveria utilizar as transformações especiais.

Se v_1 e v_2 são duas velocidades a adicionar, a velocidade resultante seria dada por:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

Sendo $v_1 = 30Km/h$, $v_2 = 30Km/h$ e $c = 40Km/h$, então:

$$V = \frac{30 + 30}{1 + \frac{30 \cdot 30}{40^2}} = \frac{60}{1 + \frac{900}{1600}} = \frac{60}{1,5625} = 38,4Km/h$$

O valor encontrado foi igual a 38,4 Km/h, sendo portanto inferior à velocidade limite.

Depois de corrigir seus cálculos, foi arrebatado pelo cansaço, que o levou a dormir profundamente. Um longo tempo depois, Isaac Einstein se levanta com fome e se depara com uma situação embaraçosa..... a hora do almoço já havia passado. Mas, por ser desenvolto e diplomático, resolve perguntar ao agente sobre a possibilidade dele utilizar a cozinha do trem para preparar uma omelete, no intuito de saciar seu apetite até a hora do lanche. O atendente, diante do olhar ansioso e ao mesmo tempo humilde daquele senhor, pede que ele o acompanhe

até a cozinha. Chegando lá, Isaac tratou de quebrar os ovos, temperá-los e então despeja-los na frigideira. Enquanto a omelete fritava, a frigideira era mexida para que a omelete não grudasse. Ao ver esta cena, o atendente meio sem jeito alerta Isaac:

- Se o senhor quiser que a omelete fique pronta logo.... não é bom mexer muito....

- Mas por que? - indaga Isaac.

- Bem, o senhor sabe que o fato de acelerar um objeto qualquer, faz com que os processos deste se tornem mais lentos, certo?

- Claro...

- Pois então.... mexer não vai ajudar a fritura da omelete; muito pelo contrário, irá retardar ainda mais o seu preparo !

Ao perceber que aquilo atrapalhava mais do que ajudava, o iniciante de cozinheiro faminto resolve deixar a omelete fritar sem “acelerá-la” desnecessariamente.

Depois do preparo, o saborear daquela omelete foi acompanhado por uma conversa descontraída com este mais novo colega, Lorentz. No meio do diálogo, Isaac retoma o episódio da omelete e pergunta para Lorentz:

- Já que você se mostra entendido no assunto de física, me diga se realmente a nossa massa aumenta simplesmente pelo fato de estarmos viajando, isto é, nos deslocando....

- Realmente, seu Isaac, a nossa massa vai aumentando de tal forma que, mesmo usando o mais potente dos motores, este trem jamais ultrapassará os 40Km/h.

- Isso significa que eu estou mais gordo? E que a omelete que preparei tinha uma massa maior do que se a tivesse preparado na estação ?

- Isso mesmo...

- E por que eu não noto nenhuma diferença? - indaga Isaac, instigado.

- É simples! Imagine que o senhor é uma formiga dentro de um pacote de doçuras, e que está saboreando uma deliciosa bala de uva. Se por acaso, tudo o que estiver no pacote, incluindo o senhor, for aumentado de tamanho, haverá alguma forma de saber se o senhor mudou de tamanho ou permaneceu do mesmo jeito?

- É claro.... embora dentro do pacote tudo pareça normal, se pudermos olhar as coisas que estão fora do pacote e que não sofreram nenhuma alteração, poderemos estabelecer comparações....
- O senhor está corretíssimo, mas falta uma coisa ! Como saber que foi o senhor que aumentou ao invés dos objetos diminuírem?
- Eh... isso eu não sei, não.

Finalmente, Isaac havia percebido a mensagem de Lorentz, que desejava convencê-lo de que o fato de estar em movimento uniforme faz com que o observador não consiga saber qual é a sua “verdadeira” velocidade, mesmo sofrendo “alterações” em função dela.

Depois de uma longa conversa com o colega, Isaac retornava à cabine pensativo, enquanto o trem passava por uma estação. Ao olhar para aquele local com aparência de abandonado, enxergou um carregador sentado num carrinho, lendo um jornal. De repente, Lorentz fez movimentos bruscos com os braços no ar e caiu de bruços, jorrando sangue. Isaac não identificou de onde veio o disparo por causa do barulho do trem, mas de imediato puxou o freio de emergência. Com o trem parado, um policial e o carregador correram para socorrer o agente Lorentz, mas já era tarde: o tiro havia acertado o coração.

Sem pensar, o policial decretou a prisão do carregador, apesar deste proclamar em altos brados sua inocência.

De imediato, Isaac toma a frente e testemunha a favor do carregador, relatando que o havia visto lendo o jornal quando o disparo aconteceu.

O guarda então retruca: - Mas o senhor estava em movimento e, portanto, o que diz nada prova absolutamente. Visto da plataforma o homem poderia ter atirado naquele mesmo instante. Não sabe que a simultaneidade depende do sistema do qual se observa ?

Depois de toda aquela conversa com Lorentz, Isaac responde firmemente ao policial:

- Desculpe, guarda, mas o senhor não tem absolutamente razão. Sei que a noção de simultaneidade é grandemente relativa, e que dois acontecimentos em lugares diferentes podem ser ou não simultâneos, dependendo do movimento do observador. Mas tenho certeza de que nenhum evento pode ocorrer antes de sua causa, isto é, ninguém morre antes de ter levado um tiro, ou ainda, fica bêbado

sem antes abrir a garrafa de pinga. Sendo assim, não poderíamos enxergar o agente cair antes de ver o disparo....

Reconhecendo o equívoco, o guarda soltou o carregador e deu início à investigação. Depois de vários depoimentos, todos os passageiros seguiram viagem, exceto Isaac. Para ele, aquele episódio foi o fim de suas férias. Ligou para o irmão e pegou o primeiro trem de volta para casa.

Ao chegar em sua cidade, encontrou o seu irmão Albert completamente surpreso com as novidades e..... com o choro do irmão.

Ao desembarcar do trem e encontrar seu irmão gêmeo com os cabelos compridos, como se houvesse passado alguns meses sem cortá-los, relembra a conversa que havia tido com seu falecido amigo sobre a relatividade do tempo.

A viagem terminou, e com ela a nossa estória, deixando claro que esta pequena narrativa apenas mostra quão interessante pode ser o estudo deste conteúdo, explicitando seu poder de exploração de conceitos e princípios físicos.

A Teoria da Relatividade altera substancialmente a nossa percepção de espaço e tempo, adentrando em terrenos e previsões até então exploradas apenas de forma fictícia. Os fenômenos presentes no cotidiano passam a possuir um status diferenciado, uma vez que se tornam apenas particularidades frente ao universo das velocidades. Por outro lado, o leque de fenômenos que se abre rumo às velocidades mais altas amplia a visão e a compreensão do universo. A viseira das concepções clássicas se rompe, transformando o mundo do cotidiano em universo de fenômenos.

A TR, embora possibilite muitas “viagens”, não foi bem recebida por todas as comunidades científicas, principalmente em se tratando daquelas que se encontravam arraigadas à idéia do espaço e tempo, do éter como base do eletromagnetismo.

II.3.2 - A RECEPTIVIDADE DA TEORIA DA RELATIVIDADE NA EUROPA

A comunidade científica não recebeu a Teoria da Relatividade Especial como um feito grandioso em vários países da Europa, com exceção da Alemanha.

Na França, por exemplo, antes do ano de 1910, poucas são as referências feitas ao nome de Einstein. Este ano marcou uma transição entre o despercebido

e o notório. Nesta data, Einstein se tornou conhecido e reconhecido pela comunidade graças à visita realizada por ele a este país. Neste cenário de introdução da TRR na França, devemos destacar a importância de Langevin, conhecido como “pai da Relatividade na França”. Suas conferências no Collège de France, em especial sobre a relação massa-energia, foram fundamentais para a penetração das idéias de Einstein no meio francês. Apesar dos indícios existentes nas notas de seus alunos e assistentes, poucas foram as suas produções efetivas em relação ao tema. Em particular, a famosa discussão sobre o Paradoxo dos Gêmeos foi por ele introduzida para atrair a atenção do grande público sobre os novos conceitos de espaço e tempo. A partir de 1910, no entanto, o panorama muda de figura a ponto de influenciar, mais tarde, a divulgação da TR no Brasil⁷⁹.

No Reino Unido, a partir da segunda metade do século XIX, a cultura científica dominada pela Escola de Cambridge, e que contava com personagens importantes como Faraday, Thomson e Larmor, avançava nos estudos sobre o éter. Isso foi o suficiente para que a TR não fosse bem recebida, nem tampouco aprofundada. “De certa forma, a proposta da eliminação do éter parecia aos físicos ingleses não uma solução ao problema, mas a perda das possibilidades de sua solução.”⁸⁰

O único país em que a TR foi aceita desde seus primeiros anos de publicação foi a Alemanha. Cientistas como Planck, Minkowski e Laub desempenharam papéis decisivos no desenvolvimento da TR neste país.

J. J. Laub, em Wurzburg, embora tenha atuado sozinho na defesa da TR, chegou a auxiliar o aprofundamento dessa teoria. Em sua tese de doutorado, calculou os efeitos relativísticos na 2ª ordem de v/c no efeito Zeemann e, posteriormente a 1910, continuou seus estudos sobre a Relatividade, centrando-se especificamente na Relatividade Geral.

Planck difundiu os conceitos relativísticos, encorajando seus estudantes a aplicar a TR a vários processos físicos. A TR sofreu grandes e intensos ataques realizados por Kauffman ao defender os conceitos de massa-longitudinal/massa-

⁷⁹ Esta influência será tratada de forma mais detalhada quando abordarmos a Influência Francesa sobre a Receptividade da Relatividade no Brasil.

⁸⁰ VILLANI (1985) p.39

transversal. Planck demonstrou que o erro do experimento era maior do que as medidas conclusivas.

Provavelmente a semelhança entre as idéias de Planck e as de Einstein sobre a Física tenha contribuído para o apoio dado pelo primeiro à relatividade. Planck atribuía enorme importância a grandezas invariantes, àquilo que é imutável, permanente e independente da percepção humana, como a velocidade da luz ou a carga e a massa do elétron em repouso. O curioso é que, embora fosse um defensor da TR, a idéia a respeito do éter continuava sendo perseguida e desenvolvida por ele⁸¹.

Minkowski, interessado em desenvolver as conseqüências matemáticas de sua formulação quadri-dimensional, acabou ajudando o desenvolvimento da teoria einsteiniana, embora o foco desta fosse completamente diferente⁸². Minkowski não se interessava pela consistência de suas formulações com as leis do eletromagnetismo, enquanto Einstein sempre explorava as conseqüências físicas das formulações matemáticas, visando àquela que integrasse o maior número de fenômenos e leis físicas.

A diferença de visão entre esses dois pesquisadores se reflete nos axiomas tidos como básicos para Minkowski, a saber:

- i) Quando a matéria está em repouso, todas as quantidades eletromagnéticas também estão;*
- ii) Qualquer velocidade obtida pela matéria é menor que a velocidade da luz no espaço “vazio”...⁸³*

O que podemos perceber claramente nestes dois axiomas é que existe uma diferença na forma de expressar e na linguagem usada, na medida em que o foco está completamente centralizado em grandezas e relações entre estas; o significado físico é uma conseqüência da relação entre grandezas, e não o contrário. O segundo axioma, que é tido por Einstein como uma conseqüência da invariância da velocidade da luz, não assume o mesmo papel para Minkowski.

⁸¹ O que possibilitou a continuidade dos estudos de Planck era o fato da TR não negar nem corroborar a existência do éter, embora a tornasse desnecessária.

⁸² A contribuição original de Minkowski foi a invariância das leis físicas para transformações de Lorentz em 4 dimensões.

⁸³ VILLANI (1985b) p. 45

Apesar da diferença de visão entre esses dois pesquisadores, podemos dizer que Minkowski assumiu um papel importantíssimo na aceitação do Princípio da Relatividade como um dos elementos fundamentais das teorias físicas, e mais decisivo ainda para o desenvolvimento da Física-Matemática, pois regras de estética, consistência e completude matemática, usadas na matemática pura, passaram a fazer parte do trabalho dos físicos teóricos.

II.3.3 - A RELATIVIDADE NO BRASIL

Como vimos anteriormente, a Teoria da Relatividade instiga o imaginário das pessoas quando prevê acontecimentos que até pouco tempo atrás só poderiam ocorrer em filmes de ficção científica. A Teoria da Relatividade Geral, por exemplo, permitiu a previsão da existência de singularidades como os buracos negros ou os buracos de minhoca, posteriormente detectados pelos astrofísicos.

Em 1919, os fenômenos astronômicos também foram importantes na história da aceitação da TR. Surge a possibilidade de testar experimentalmente as previsões einsteinianas sobre o desvio da luz nas vizinhanças do sol através de um eclipse. Criou-se assim uma expectativa em relação ao episódio, fazendo com que a imprensa levasse a público artigos sobre a “nova” teoria. O fato da divulgação da TR ter ocorrido através deste tipo de fenômeno fez com que essa teoria tivesse uma grande repercussão no âmbito social, pois interagiu com o imaginário e as crenças humanas proporcionados pelo céu e seu significado.

De acordo com as previsões dos astrônomos, os melhores pontos de observação eram: Sobral - no Estado do Ceará – Brasil; e Príncipe, na África. No mês que antecedeu o eclipse, saiu no *Jornal do Comércio*⁸⁴, do Rio de Janeiro, a primeira publicação destinada a ilustrar as atividades que estavam sendo realizadas em Sobral. Em 29 de maio de 1919, dia do eclipse, um segundo artigo no mesmo jornal, escrito pelos astrônomos britânicos Crommelin e Davidson, detalhavam as finalidades das medidas astronômicas a serem realizadas, bem como explicações sobre a Relatividade.

O eclipse começou às 7 h e 46 min e terminou às 10 h e 28 min, sendo total apenas entre 8hs e 58 min e 09 h e 03 min, ou seja, durante 5 min e 12 segundos.

⁸⁴ CAFARELLI (1995), p. 101

Embora curto, o tempo foi suficiente para iniciar uma jornada de publicações e de discussões sobre os resultados das observações e a possível confirmação da Relatividade.

A observação em Sobral contou com uma expedição brasileira composta por Domingos da Costa e Allyrio de Mattos, engenheiros assistentes no Observatório Nacional do Rio, por Th. H. Lee, do Serviço Geológico e especialista em espectroscopia, pelo meteorologista Luiz Rodrigues e pelo técnico Artur de Castro Almeida, todos eles chefiados por Henrique Morize. Em 1920, Morize⁸⁵ expõe os acontecimentos relacionados ao eclipse observado, bem como seus resultados. Relata que o objetivo primeiro da expedição brasileira não era o de fazer medidas referentes à deflexão da luz, e sim, estudar a forma e a disposição da coroa solar, além de analisar sua composição espectroscopicamente.

Além da equipe brasileira, Sobral abrigou outras duas: a americana e a britânica. A primeira foi encaminhada pelo diretor do departamento de magnetismo terrestre do Instituto Carnegie, Louis Bauer, com o propósito de completar as observações da comissão brasileira e atendendo o pedido de auxílio desta última face a deficiência em equipamentos para estudar os efeitos do eclipse sobre o magnetismo terrestre e sobre a eletricidade atmosférica. A comissão americana era composta por pesquisadores diplomados pela Universidade de Harvard, a saber, Daniel Wise e Andrews Thomson.

A única comissão que realmente se propunha a recolher dados suficientes para pôr a prova a Teoria da Relatividade era a britânica, enviada pelo Observatório de Greenwich, e constituída de dois astrônomos britânicos, A. C. D. Crommelin e D. Davidson, além de um intérprete brasileiro, Leocardo de Araújo, o qual havia se formado nos Estados Unidos.

Possivelmente, a primeira publicação de autor brasileiro sobre a relatividade data de 12 de novembro de 1919. O artigo em *O Jornal*, do Rio de Janeiro, escrito por Amoroso Costa, versava basicamente sobre os resultados das observações do eclipse, que haviam sido divulgados alguns dias antes, em Londres, e que corroboravam as previsões einsteinianas. Em relação aos resultados obtidos, afirma ter sido “o mais esplêndido sucesso”, “a grande notícia de ciência pura que nos manda depois da guerra a Europa sempre fecunda”.

⁸⁵ MORIZE (1919)

A partir do ano de 1920, algumas publicações⁸⁶, inclusive de outra natureza que não a jornalística, contribuíram para a divulgação das teorias de Einstein no Brasil.

No meio acadêmico brasileiro, ainda em formação, ela era mais aceita do que rejeitada. A conduta de Roberto Marinho, Amoroso Costa e Luiz Freire em relação à teoria era de completo entusiasmo. Ela também foi aceita por Henrique Morize e Theodoro Ramos. A única oposição foi feita por Licínio Cardoso.

Amoroso Costa, influenciado pelas discussões ocorridas à respeito da Relatividade no período em que residiu na França - entre 1920 e 1921 -, acaba escrevendo um novo artigo em *O Jornal*. Dividido em duas partes: uma delas publicada no dia 19 de março e a outra em 2 de abril de 1921, o artigo foi intitulado “À Margem da Teoria de Einstein”. Em seguida, publica um artigo na *Revista Brasileira de Engenharia*⁸⁷. Nos meses de maio e de junho de 1923, deu quatro conferências sobre a relatividade na Escola Politécnica do Rio, que foram a matéria de seu pequeno livro *Introdução à teoria da relatividade*.

Os primeiros artigos de Amoroso Costa, bem como a forma com que expõe os princípios da Teoria da Relatividade em seu livro, marcam o início de um período no qual as idéias difundidas e aceitas no Brasil provém em grande parte da influência francesa. No período em que este pesquisador esteve na França, manteve contato com as idéias de Poincaré que, embora pregasse uma teoria diferente da einsteiniana, já revelava insatisfações com as interpretações baseadas no éter eletromagnético. A influência francesa sobre este e outros pesquisadores se deu tanto pela via dos contatos diretos, como o intercâmbio de cientistas, quanto pelos impressos - artigos e livros franceses.

II.3.3.1 - A INFLUÊNCIA FRANCESA

A França e o Brasil, desde o começo deste século, começaram a estabelecer relações muito fortes no campo científico, mais especificamente no ramo da Física e da Matemática. A iniciativa dessa ligação foi Francesa e se deu

⁸⁶ Não abordaremos todas elas, mas apenas aquelas que julgamos importantes para o processo de disseminação da TR no Brasil, em função dos impactos provocados na comunidade científica e/ou no público em geral.

⁸⁷ COSTA (1922)

no fim do século XIX, a partir da fundação da Aliance Française, que buscava ampliar as relações intelectuais internacionais. Em 1907, por iniciativa de cientistas, o *Groupement des Universités et Grandes Écoles de France pour Relations avec Amérique Latine* foi criado para estabelecer relações diretas entre o meio intelectual da França e os países da América Latina, dentre os quais o Brasil. O objetivo primeiro deste grupo era o de expandir a influência cultural francesa, buscando neutralizar a concorrência dos outros países igualmente desejosos de expansão, sobretudo a Alemanha.

Esse fato refletiria mais tarde na fundação do Instituto Franco-Brasileiro de Alta Cultura. O decreto de sua fundação, publicado em 1923, estabelecia para os dois países interessados a co-participação na manutenção econômica do instituto e dos outros meios necessários a seu funcionamento⁸⁸.

Na década de 20, ocorreu um intercâmbio⁸⁹ importante entre esses dois países no campo da ciência, quando 10 especialistas em ciências nos visitaram, sendo que, dentre eles dois eram partidários da teoria de Einstein: Emile Borel e Jacques Hadamard⁹⁰.

Em 1922, Emile Borel pronunciou uma conferência sobre a teoria da relatividade na Academia Brasileira de Ciências e ocupou lugar de destaque na comemoração do Centenário da Independência.

Paty⁹¹ nos revela que desde o início do século, existia no Brasil uma corrente de Física-Matemática pela qual a Física Teórica se impôs pouco a pouco. Essa corrente era influenciada pela tradição francesa de Poincaré a Painlevé, Picard e Borel. Por esse motivo, chama a nossa atenção para analogias entre a recepção da TR no Brasil e na França. O tratamento dado às idéias de Einstein nos escritos de Amoroso Costa e Luiz Freire, embora de áreas diferentes, se comparado com os realizados pelo próprio Einstein, por Paul Langevin ou Emile Borel, revelam especificidades de estilo científico e permitem pôr em evidência como o nascimento de uma Física Teórica brasileira reproduziu

⁸⁸ Decreto 4634, de 8 de janeiro de 1923

⁸⁹ PETITJEAN (1988), p. 429-437.

⁹⁰ Esses dois cientistas haviam participado de cursos ministrados por professores do Collège de France, em particular Paul Langevin, que encontrava nas teorias de Einstein uma profunda identidade com as suas próprias teorias.

⁹¹ PATY (1996), p. 169

a francesa. Paty, a respeito da apresentação das idéias essenciais da Relatividade exposta no livro de Amoroso Costa, afirma que:

...É interessante examinar a maneira pela qual a teoria é apresentada aí, tendo, por comparação, o espírito de outras obras de volume semelhante e publicadas na mesma época: as conferências de Einstein em Princeton, em 1921, um opúsculo de Paul Langevin datado de 1919 (...) um outro de Emile Borel publicado no ano seguinte, ou ainda, lembrando as diversas maneiras de argumentar sobre os conceitos da teoria, sua formulação matemática, sua relação com a experiência, tais como elas são confrontadas na Academia de Ciências de Paris em 1920-1923.⁹²

Em relação às conferências proferidas pelo professor Luiz Freire em Recife em 1924, na primeira delas, sobre “As Teorias de Einstein”⁹³, ele esboçou uma apresentação do conjunto da teoria, com a intenção de mostrar que os aspectos que pareciam à primeira vista surpreendentes são de fato totalmente razoáveis. Cita então uma frase de Paul Langevin, segundo a qual “as teorias de Einstein nos abrem uma nova janela para a eternidade”. Além dessa referência, Freire cita outras obras francesas da época, como as de Gaston Moch ou Lucien Fabre.

Até mesmo o opositor Licínio Cardoso, professor de mecânica racional na Escola Politécnica do Rio de Janeiro, resistiu à nova teoria através de argumentos muito similares aos opositores franceses, como por exemplo Léon Lecornu, titular da cadeira de mecânica na Sorbonne⁹⁴.

O movimento de discussão da TR, em que prós e contras são revelados, pode ser resumido em alguns poucos episódios, como o artigo publicado por Henrique Morize em 1920, na revista da Academia⁹⁵. Apresentando duas opiniões distintas, Morize mostrava que o tema da relatividade era alvo de especulação e debate. A primeira posição seguia a defesa de F. W. Dyson, diretor do

⁹² PATY (1996), p. 169

⁹³ FREIRE (1924)

⁹⁴ LECORNU (1922)

⁹⁵ MORIZE (1920). Neste artigo, Morize informava aos interessados em se aprofundar na questão, que um relato mais amplo do debate sobre o assunto fora publicado na revista *The Observatory*, em novembro de 1919.

Observatório de Greenwich, onde foram estudadas as chapas que comprovaram a TR; em contraposição a essa opinião, o autor apresentava os argumentos de Eddington, da Universidade de Cambridge, sobre a insuficiência dos dados. A alegação de que apenas sete estrelas haviam sido fotografadas no eclipse de 1919 realmente colocava em dúvida os resultados obtidos, no entanto; em 1922, a missão norte-americana instalada em Wallal, na Austrália, foi favorecida por magníficas condições atmosféricas de visibilidade durante um novo eclipse e, sob a direção do astrônomo Campbell, do Observatório de Lick, cento e dezoito estrelas foram fotografadas e corroboravam as previsões da relatividade.

Um outro episódio de discussão da Teoria se deu entre Licínio Cardoso e o próprio Einstein, em 1925, quando este último proferia uma palestra na Academia Brasileira de Ciências. Como era de se esperar, Einstein não se abalou com as colocações realizadas pelo opositor e as esclareceu.

Este último relato, com certeza, é apenas um dos vários episódios que fizeram com que a visita de Einstein ao Brasil se tornasse um marco na aceitação e divulgação da relatividade.

II.3.3.2 A VISITA DE EINSTEIN AO BRASIL

A visita de Einstein foi o segundo grande acontecimento para a divulgação da Teoria da Relatividade, pois o primeiro foi o eclipse de 1919. O fator principal que o levou a visitar o Brasil não foi nenhum convite feito pela comunidade científica da época, como poderíamos pensar. Na verdade, o convite recebido por ele foi da Argentina e não se limitava a uma simples visita, mas de uma parada de um mês, com a perspectiva, parece, de um convite permanente.

A iniciativa data de 1923, quando o doutor Lugones, jornalista e escritor, se encontrava na Alemanha. Einstein estava sendo vítima, naquele país, de alguma perseguição em consequência de sua atitude durante a guerra e também por sua condição de judeu. O doutor Lugones lançou então a idéia de oferecer-lhe uma cátedra na Universidade de Buenos Aires, que foi endossada por um grupo de escritores e professores argentinos, resultando em seguida num manifesto. A idéia, porém, não obteve força suficiente até o momento em que o Centro dos Estudantes de Engenharia renovou-a numa petição ao diretor da Universidade de

Buenos Aires. Além disso, o Instituto Cultural Germano-Argentino e a Associação Hebraica apoiaram a idéia e se disseram dispostos a cooperar financeiramente para a sua realização. No entanto, Einstein recusou o convite, agradecendo-o e afirmando existirem no momento outras preocupações que o impediam de viajar. Os integrantes do movimento, no entanto, não desistiram e, em seguida, com a adesão das universidades de La Plata, Córdoba, Tucuman e do Litoral, o trabalho foi retomado. Diante de tamanha pressão, até o governo argentino optou por contribuir assumindo as despesas com passagens e hospedagem.⁹⁶

Einstein resolve então ir à Argentina e, nessa mesma época, viaja para vários países como o Japão, os Estados Unidos e a Espanha. À caminho da Argentina, eis que o cientista passa pelo Rio de Janeiro, mais precisamente no dia 21 de março de 1925. Foi recebido no porto do Rio por uma comissão designada pelo então Presidente da Academia Brasileira de Ciências, professor Henrique Morize, e composta dos senhores Daniel Henninger, Ignácio do Amaral, Sodré da Gama, Maurício Joppert, Roberto Marinho e Pantoja Leite. No cais, vários grupos aguardavam ansiosamente pela chegada do “mestre”. Nessa primeira visita, Einstein não se demorou pois seu objetivo mesmo era a Argentina, mas retornou ao Brasil no mês seguinte depois de uma jornada que englobou também Montevideú.

Embora o tempo fosse curto, um almoço relatado pelo ilustre Assis Chateaubriand, diretor de *O Jornal*, já mostra a importância dada ao grande cientista:

Quantos se achavam sentados com ele à mesa fixavam os dois traços mais fortes da sua personalidade: uma testa alta, excessivamente alta, inteligente, iluminada e umas mãos brancas de marfim, mão da mais íntima e suave espiritualidade. Como ninguém ignora, Einstein toca violino; tem uma sensibilidade artística peregrina...

E quanto à sua partida:

⁹⁶ CARARELLI (1995), p.104, afirma que “...para ter uma idéia do interesse argentino, é suficiente notar que a Universidade de La Plata...já tinha votado a soma de 2 mil pesos para os gastos da viagem de Einstein.”

Antes de partir, levaram Einstein ao centro. Ele desceu do automóvel na rua Sete de Setembro... A multidão o reconheceu e pouco depois era seguido de um grande número de pessoas... Às quinze horas Einstein embarcou.

No dia 4 de maio de 1925, o cientista retorna ao Brasil, sendo dessa vez recepcionado por membros da Comissão de Recepção nomeada pelo Clube de Engenharia juntamente com a Escola Politécnica e a Academia de Ciências.

Daí em diante, Einstein, sempre cercado de autoridades ilustres e do público em geral, iniciou uma série de compromissos, como visitas, conferências e jantares. A primeira conferência foi realizada no Clube de Engenharia no dia 6 de maio. Relata Cafarelli⁹⁷ a respeito dessa conferência:

O vasto salão de conferência foi pequeno para conter a enorme assistência que ocorreu para ouvir a palestra marcada para as quatro da tarde. Já dez minutos antes, ninguém podia entrar, senão à força de bravas cotoveladas. Um “rancho” de fotógrafos inquietos montava guarda no espaço livre entre a mesa e o quadro negro (...) Logo de pé, o célebre físico caminha na direção do quadro-negro, entre palmas, poltronas que se arrastam, pessoas que sobem em cadeiras e até em mesas, enquanto outras se amontoam junto ao cavalete.

Este episódio foi marcado pelo público em geral, muitas vezes, sequer sabia os princípios da teoria defendida pelo palestrante. O alvoroço era provocado pelo ícone Einstein e não pelas suas idéias. Mais adiante, Cafarelli⁹⁸ deixa isso bem claro em seu texto:

Nas escadas do Clube de Engenharia, há assim um vaivém constante e na calçada, em frente à porta, movem-se grupos: - “O Einstein está falando ali em cima”. – “É verdade. Vou subir... a entrada é franca”. –

⁹⁷ CAFARELLI (1995), p. 117/118

⁹⁸ Idem, p. 119

“Eu não, não entendo nada... em matemática nunca passei da conta de dividir”. – “Que importa! Eu quero só ver o colosso, até já”.

O ícone Einstein ou, como foi referido acima, o “colosso”, se tornava cada dia mais popular. Um mito fora criado em torno do seu nome, tendo como ancoragem a sua importância no contexto científico. A imagem de “gênio” e até mesmo “sobre-humano” era sempre transmitida nas reportagens jornalísticas veiculadas. Anúncios como “Einstein comeu, ontem, vatapá com pimenta”⁹⁹ mostram a superioridade atribuída a este cientista. Outros, ainda, como “UM GENIO, COM UMA PARCELA DE DIVINDADE: Einstein desembarcou ontem, acolhendo a inteligência brasileira com vivo carinho”¹⁰⁰ são exemplos de contribuições que refletiriam mais tarde na imagem produzida em torno de Einstein.

Foi por esse motivo que a sua segunda conferência, realizada em 08 de maio de 1925, e proferida na Escola Politécnica, foi restrita a convidados especiais, professores e estudantes da escola.

Em ambas as conferências Einstein não utilizou cálculos complicados, discorrendo mais a respeito das principais conclusões da teoria. Em relação aos debates que ocorreram na segunda, tendo em vista que na primeira ocasião não havia condições favoráveis, não corresponderam às expectativas do expositor. Essa decepção exposta pelo próprio Einstein resultou de um conjunto de fatores, como a ausência de Amoroso Costa, que estava na França, e de Henrique Morize, que estava doente. O fato da comunidade científica brasileira ser pequena, e menor ainda o número dos que verdadeiramente compreendiam e articulavam a teoria de Einstein fez com que não houvesse “substituto” para os célebres defensores da relatividade. Não podemos esquecer do monopólio exercido pelos oficiais e ilustres do governo que haviam planejado uma série de compromissos formais o que impediu inclusive uma aproximação mais forte com os universitários.

Esta segunda conferência, no entanto, não foi destituída de importância, pois os opositores da TR e da nova ciência que se formava foram vencidos e o

⁹⁹ Matéria de O JORNAL, do Rio de Janeiro em 12 de maio

¹⁰⁰ Matéria de O JORNAL, do Rio de Janeiro em 22 de maio

positivismo que ainda imperava na comunidade científica brasileira da época foi profundamente abalado diante da exposição do sábio, abrindo a porta ao desenvolvimento da pesquisa nas matérias fundamentais.

A estadia de Einstein no Rio, como foi citado anteriormente, foi marcada por várias visitas: ao Palácio do Catete, ao Museu Nacional de Ciências Naturais, à sede da Academia Brasileira de Ciências, ao Instituto Oswaldo Cruz, ao Clube Germânia onde recebeu várias homenagens da colônia alemã, ao Observatório Nacional, entre outras.

Um dos episódios que fizeram com que sementes fossem lançadas ao futuro foi a visita à Academia Brasileira de Ciências. Naquele dia 7 de maio, à tarde, Einstein foi recebido pelo professor Juliano Moreira – representando o professor Morize, adoentado – que, depois de um breve discurso, leu a proposta subscrita pelos acadêmicos, solicitando a sua admissão como Membro Correspondente da Academia. A proposta foi aceita por aclamação e, depois de alguns discursos e cerimônias, foi instituído o prêmio Einstein, medalha de ouro e diploma, a ser entregue a cada ano ao acadêmico que melhor memória produzisse sobre os assuntos daquela seção. O primeiro prêmio foi concedido no ano de 1931 e entregue com atraso, em 1933, para o biólogo Miguel Ozório de Almeida, demonstrando que o alcance do evento se expandiria à ciência e pesquisa em geral, ao invés de apenas à Física, como poderia se imaginar.

Através dessas poucas passagens descritas, pode-se perceber que Einstein afetou todas as camadas sociais, desde o público em geral através da primeira conferência, de suas visitas a locais públicos e também dos artigos jornalísticos, até a alta sociedade, passando pelas comunidades científicas da época. Cada grupo encontrava em Einstein um motivo de orgulho e de apreço, desde a sensibilidade para a música (como relatado por Chateaubriand) ou ainda a forma desenvolta de tratar dos domínios mais complicados da física.

A sua passagem deixou frutos, como não poderia deixar de ser. Theodoro Ramos publica o primeiro artigo brasileiro de física teórica em 1929, na revista da Escola Politécnica de São Paulo. Em contrapartida, Licínio Cardoso, não admitindo uma revisão por uma nova teoria que considerava mera metafísica, escreveu o artigo “A Relatividade Imaginária”, em que fazia uma crítica contundente à teoria de Einstein, mas que só foi publicado em *O Jornal* no dia 12

de maio de 1925, depois da partida de Einstein. Este último artigo chegou a provocar polêmica dentro da comunidade, mesmo porque era fruto de toda uma articulação entre o autor e outros opositores internacionais.

No entanto, Licínio não encontrou apoio em seus pares e, para dar um fim a esta questão, Roberto Marinho apresentou uma defesa da teoria de Einstein que depois foi publicada nos anais da Academia com o título “Resposta a Algumas Objeções Levantadas entre Nós contra a Teoria da Relatividade”¹⁰¹. A polêmica perdurou ainda por mais algum tempo, de forma a constar nos anais da academia até 8 de julho. Alimentando as discussões, surgem artigos de Luiz Freire e Amoroso Costa, até que no final da década de 20 o cenário aparentemente se estabilizou.

A introdução da Teoria da Relatividade no Brasil, com certeza, era o correspondente científico do movimento mais geral de abertura à modernidade, do rompimento com os valores tradicionais em busca de um progresso da sociedade. A busca da ciência pura como fonte de conhecimentos para a mudança do cotidiano, e para a conseqüente evolução dos padrões sociais era a bandeira defendida por muitos dentro da comunidade científica. Einstein dá uma idéia da influência da ciência na sociedade com os seguintes dizeres:

*A ciência americana trabalha de modo rápido e intenso e com capacidade de invenção também. Temos que sofrer, nós europeus, a sua concorrência nesse sentido. A Europa guarda ainda o principado das ciências especulativas; mas isto é apenas uma questão de tradição. Amanhã ela poderá perder esse terreno... A possibilidade da Europa manter sua hegemonia intelectual... hoje seriamente ameaçada pela concorrência dos povos jovens de outros continentes, que ela formou, educou e civilizou.*¹⁰²

Se, por um lado, Einstein se tornou um ícone da genialidade para a sociedade, por outro, a comunidade científica o transformou num representante da inteligência inovadora, sendo a TR seu maior produto. Estabelecer relações

¹⁰¹ MARINHO (1926).

¹⁰² O Jornal, 22/03/1925, p. 1 e 2

com ele e mantê-las vivas simbolizava a abertura das portas para um novo mundo.

CAPÍTULO III

TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA: UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE

III.1 - INTRODUÇÃO

Temos enfatizado ao longo deste trabalho a necessidade de se inserir a Teoria da Relatividade no Ensino Médio dentro de uma perspectiva cultural. A veiculação do ícone Einstein na mídia de um modo geral tem exercido pressões no âmbito escolar, gerando assim um movimento de atualização do currículo da Física.

Este quadro nos remete à busca do entendimento do processo de introdução de um conteúdo científico no contexto escolar. Somente desvendando essa questão poderemos entender melhor as relações existentes entre o universo físico e os conteúdos escolares. Uma proposta de ensino da Relatividade terá maior chance de sucesso se procurar nutrir-se na fonte do conhecimento destas relações. Sem entender melhor a estrutura que rege a inserção de conteúdos físicos, não conseguiremos estabelecer parâmetros de avaliação de nossa proposta, nem tampouco saber qual(is) o(s) tipo(s) de pressão(ões) que o ícone Einstein realmente exerce sobre a sala de aula.

Ao comparar o conteúdo escolar com a produção científica, temos, de início, a impressão de que existe uma simplificação. Em geral, o formalismo matemático, os problemas propostos e os conceitos apresentados na escola são significativamente menos complexos no primeiro domínio, quando comparado com o segundo. A apresentação de um conceito como o da luz (onda eletromagnética), entre outros, não segue o formalismo matemático que é corrente na comunidade científica (equações de onda com derivadas parciais, por exemplo). Quando a Eletricidade é abordada no Ensino Médio, as derivadas são transformadas em variações das grandezas:

*Corrente elétrica*¹⁰³ $\Leftrightarrow i = dq/dt$ é apresentada como sendo $i = \Delta q/\Delta t$

¹⁰³ SILVA(2000), p. 267.

O mesmo tipo de simplificação ocorre quando a Segunda Lei de Newton é abordada:

*Força Resultante*¹⁰⁴ $\Rightarrow F = dp/dt$ é apresentada como sendo $F = m.a$

Este último exemplo apresenta ainda uma outra simplificação, não tão evidente: ela só é válida para fenômenos que envolvam corpos rígidos e de massa constante!! Assim sendo, os exercícios ou problemas jamais tratarão de casos reais, estabelecendo sempre situações ideais. Algumas observações são muito freqüentes ao longo do tratamento da dinâmica no Ensino Médio, como:

- exclua a resistência do ar;
- considere o plano perfeitamente liso e sem atrito;
- despreze as dimensões do corpo e;
- considere o valor de g constante durante o movimento¹⁰⁵.

Uma boa parte da dificuldade encontrada pelos alunos em aplicar tais ensinamentos no cotidiano é fruto dessas constantes restrições quanto ao domínio de validades das leis e princípios tratados no Ensino Médio. Quando uma caixa é empurrada e, em seguida solta, ela não realiza o tão estudado Movimento Retilíneo e Uniforme, parando pouco depois. Desprezar o atrito nessa ocasião, da mesma forma que desprezar o atrito com o ar durante o lançamento de um projétil, é fechar os olhos para o que realmente acontece e se imaginar num mundo que, para o aluno ainda não existe. Como aceitar a Lei da Queda-Livre, se vivemos imersos no ar, onde os objetos mais densos chegam primeiro ao chão ?

Vale a pena, neste instante, abrimos um parênteses para frisar que, na verdade, essas simplificações são fruto de escolhas e de uma história precedente da “física”, e não dos alunos.

Gerard Fourez¹⁰⁶, ao se referir à evolução histórica dos caminhos científicos e suas bifurcações, questiona o quão absoluta pode ser a estruturação dos saberes científicos em disciplinas. Com relação a isso, afirma que:

¹⁰⁴ Idem, p. 68

¹⁰⁵ g é o valor da aceleração da gravidade na superfície terrestre.

¹⁰⁶ FOUREZ (1994)

*o desenvolvimento da filosofia e da sociologia das ciências dão uma resposta cada vez mais unânime: as ciências são respostas fornecidas pelos humanos às questões que eles delinearão*¹⁰⁷.

Se outras questões tivessem sido propostas e outros caminhos fossem trilhados na busca de respostas, isto produziria outras disciplinas científicas. Fourez, mais adiante, ainda complementa este raciocínio dizendo que:

*se os seres inteligentes tivessem vivido na água, como os golfinhos, por exemplo, sua “física” teria considerado o atrito como essencial a todo modelo teórico interessante, enquanto a noção de gravidade teria sido muito mais secundária (o que quer dizer que a “física de Galileo” não teria sido, sem dúvida, jamais inventada pelos golfinhos “físicos”).*¹⁰⁸

Assim, podemos fazer duas afirmações: de acordo com a primeira, o aluno não vive num mundo “físico”, pois suas teorias não foram construídas em laboratórios, nem tampouco resultaram de observações científicas, o que faz com que exista um abismo entre o que ele vivencia e o que lhe é ensinado; a segunda se refere às diferenças entre o que é significativo para o aluno, diante de suas observações e teorias, e o que é significativo para a Física, ou seja, mesmo que questões importantíssimas para a Física sejam abordadas ao longo do ensino, elas nem sempre são questões interessantes ou pertinentes no mundo do aluno.

Este parênteses vem reforçar ainda mais o caráter de simplificação dos conteúdos quando um saber científico é ensinado no contexto da sala de aula. Uma análise um pouco mais aprofundada nos mostra que, embora a simplificação exista, ela não é a única transformação produzida. O processo é mais complexo e envolve outras transformações.

Um dos fatores observados que nos ajuda a fundamentar essa afirmação: várias atividades propostas pelo livro didático e também pelo professor não fizeram e não fazem parte da prática científica. Boa parte dos exercícios de

¹⁰⁷ Idem, p. 88

¹⁰⁸ Ibidem, pp. 88 e 89

Cinemática e de Termometria, por exemplo, nunca foram objeto de estudo da Física. Não existe nenhum grupo de físicos estudando transformações de escalas termométricas, nem tampouco algum que tenha como objeto de pesquisa o tempo de queda de uma lasca de madeira que se solta de uma ponte¹⁰⁹.

A contextualização que é feita durante a apresentação de algumas teorias ou conceitos não é neutra, chegando algumas vezes a ser artificial (não ocorreu de fato). O relato da queda da maçã que teria sido responsável pela descoberta da Lei da Gravidade é um exemplo típico.

Abordando o fenômeno de dispersão da luz branca, Ramalho¹¹⁰ faz alusão a Newton através de uma foto com legenda, na qual se lê:

Isaac Newton realizou várias experiências no sentido de explicar as cores, descobrindo que um feixe de luz solar, ao atravessar um prisma de vidro, decompõe-se num feixe colorido denominado espectro da luz solar

Nas entrelinhas, subentendemos que foi Newton o primeiro a ver a dispersão da luz branca, o que não é verdade. Além disso, a apresentação desse fenômeno se dá de forma dogmática, pois não existe nenhuma forma de argumentação, nem descrição da natureza da luz policromática. A “descoberta”, sendo originária das experiências realizadas denota um forte empirismo científico, através do qual o cientista é capaz de conhecer a verdade que existe na natureza. Existe uma “impessoalidade” na descoberta, pois qualquer cientista que realizasse os mesmos testes, nas mesmas condições, chegaria ao mesmo resultado, não sendo necessário, portanto, relatar as inúmeras discussões e interpretações em torno da natureza da luz. Os PCNs nos alertam neste sentido:

Para o Ensino Médio meramente propedêutico atual, disciplinas científicas, como a Física, têm omitido os desenvolvimentos realizados

¹⁰⁹ Cálculos como esse ou similar estão presentes em vários livros do Ensino Médio quando o tema MRUV ou Queda-Livre é tratado.

¹¹⁰ RAMALHO (1994.)

*durante o século XX e tratam de maneira enciclopédica e excessivamente dedutiva os conteúdos tradicionais.*¹¹¹

O que percebemos com essas avaliações é que não existe uma neutralidade na apresentação dos conteúdos, e sim a criação de uma Física Escolar, que embora possua vínculos com a Física Científica, se mostra completamente modificada e transformada.

Quando um currículo de Física é estruturado, apenas algumas teorias e práticas científicas são escolhidas. Dentro dessa perspectiva, o currículo de Física contempla apenas alguns tópicos de saberes científicos, e esta prática resulta na quebra das ligações existentes entre estes e outros tópicos da mesma área ou de áreas distintas. É fácil percebermos a estrutura espacial complexa na qual um tópico está inserido. A luz, por exemplo, está conectada aos conceitos de campo elétrico, de campo magnético, de ondas, de partícula, de energia, de fenômenos ópticos, além de estabelecer relações com fenômenos físicos como a espectroscopia e a difração, com fenômenos químicos como as substâncias sensíveis à luz, ou ainda com fenômenos biológicos como a fotossíntese. O som, por outro lado, se liga ao conceito de ondas mecânicas, ao efeito doppler, à acústica dos ambientes (arquitetura), ao funcionamento de sonares, à escala musical, ao conceito de frequência e amplitude, entre outros.

A compartimentalização do saber se concretiza nos livros através de uma linearização. O índice e a divisão em capítulos e sub-capítulos, configuram uma lista hierarquizada, onde se parte dos conteúdos admitidos como mais simples para os mais complexos. A impressão transmitida ao aluno é a de que a Física também é separada em ramos independentes, de tal forma que se dedicar a um deles não implica em dominar conceitos de outros. Isso se deve ao tratamento dado aos conteúdos (didática) que geralmente têm como parâmetro a forma de apresentação dada no livro.

Hoje em dia, a pesquisa em ensino parece ter acordado para o prejuízo conseqüente da compartimentalização do saber, que limita a visão do aluno perante os aspectos relevantes nos acontecimentos diários¹¹². As habilidades e

¹¹¹ PCN (2000)do Ensino Médio, Parte III , pág. 8

¹¹² ROBILOTTA & SALÉM (1981)

competências almejadas via Interdisciplinaridade e Contextualização, exigidas nos PCN's vêm reforçar a idéia de que o tratamento não apenas da Física, mas também das disciplinas afins, de forma integrada é benéfica na formação do aluno:

Por isso tudo, o aprendizado deve ser planejado desde uma perspectiva a um só tempo multidisciplinar e interdisciplinar, ou seja, os assuntos devem ser propostos e tratados desde uma compreensão global, articulando as competências que serão desenvolvidas em cada disciplina e no conjunto de disciplinas, em cada área e no conjunto das áreas. Mesmo dentro de cada disciplina, uma perspectiva mais abrangente pode transbordar os limites disciplinares.¹¹³

Ao longo desse mesmo texto, deixa claro que esses objetivos, compatíveis com os valores e as atitudes que se pretende desenvolver, podem ser reunidos por competências e habilidades. Uma outra forma possível é utilizar como parâmetro as interfaces com as outras duas áreas do conhecimento. Os objetivos ou competências atribuíveis à área de 'Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias' podem ser subagrupados, de forma a contemplar ambos esses critérios. Assim, aliam-se as competências e habilidades de caráter mais específico na categoria 'Investigação e Compreensão Científica e Tecnológica'. Aquelas que, de certa forma, se direcionam no sentido da representação e comunicação em Ciência e Tecnologia estão associadas à categoria 'Linguagem e Códigos'. Já as relacionadas com a contextualização sócio-cultural e histórica da ciência e da tecnologia devem se associar à categoria 'Ciências Humanas'.

Sabemos que essas modificações, mais que necessárias, são inevitáveis, na medida em que o aluno não é – e nem deve ser encarado como - um mini-cientista. No caso deste, o contexto em que se dá o estudo das teorias referentes à natureza é muito diferente daquele no qual se insere o aluno; os objetivos a serem alcançados através das teorias estudadas também são diferentes. Teremos, portanto, como resultado, conhecimentos e histórias diferentes.

¹¹³ PCN do Ensino Médio, Parte III – “Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias”, p. 9

Se nos reportarmos ao próprio meio científico, conseguiremos notar que as transformações existem desde o seu interior pois, quando um pesquisador publica seus trabalhos/resultados experimentais ou teóricos, a formatação sempre deve seguir determinadas regras, uma sistemática.

REICHENBACH¹¹⁴ identifica dois momentos cruciais na prática científica: o *contexto da descoberta* e o *contexto da justificação*. O primeiro se refere à etapa em que a busca de respostas para determinado problema por parte dos cientistas é influenciada por diversos fatores. Nesta etapa não existe uma sistemática explícita ou um método único, na medida em que são utilizadas nessa busca desde a troca de idéias com outros pesquisadores da área até a reflexão própria. Esse processo é dinâmico, fortemente influenciado por fatores de ordem psicológica, e só será encerrado quando uma resposta satisfatória for encontrada.

A partir de então, cabe ao cientista tornar pública sua descoberta, sua teoria, sua solução, mesmo porque é dessa forma que esta será testada e avaliada pelos pares e, a posteriori, incorporada ou não ao corpo de conhecimento da ciência. Esse momento é chamado de *contexto da justificação*.

A publicação de tal conhecimento, no entanto, não deve ser feita de forma aleatória ou ainda fiel a todos os passos dados durante a pesquisa; é necessário que todo o processo seja divulgado dentro de um certo formato, seguindo normas específicas exigidas pelas revistas e meios de publicação científica. Relatar um experimento, por exemplo, não é a mesma coisa que redigir um texto onde os fatos e acontecimentos ocorridos durante a experiência são narrados, pois nem todos eles são relevantes. É por isso que, em geral, o contexto descrito não corresponde fielmente ao ocorrido, assim como o resultado obtido pelo pesquisador ou pelo grupo sempre deve ser transmitido como sendo alheio aos personagens, já que o trabalho publicado é uma contribuição científica e não pessoal.

Entre as duas etapas, o conhecimento passa, portanto, por uma racionalização, que é refletida na impessoalidade e na reformulação do contexto

¹¹⁴ REICHENBACH (1961)

em torno da pesquisa. É esse texto que será apresentado em congressos e simpósios, ou ainda divulgado na forma de artigo.

Este material, por sua vez, será utilizado como referência para divulgar a ciência, ou ainda para a confecção de textos didáticos. O conteúdo apresentado nos livros didáticos não é, pois, apenas uma simplificação sistematizada do conhecimento científico, visando a sua aplicação em sala de aula. O conteúdo escolar é fruto de todo um processo de construção de um saber.

Escolhas foram feitas, histórias foram construídas, alguns significados foram omitidos enquanto outros foram criados, não havendo portanto neutralidade. Desta forma, as modificações que o conhecimento sofre até ser publicado nos livros didáticos já se inicia no âmbito da comunidade científica, na medida em que, o pesquisador não publica tudo aquilo que ele pensa ou acha, mas apenas o que, ele acredita, tem chance de ser aceito e corroborado pelos seus pares.

III.2 - O SISTEMA DIDÁTICO E A TRANSPOSIÇÃO DE SABERES

Chevallard, em seu livro¹¹⁵ feito a partir das notas preparatórias de um curso ocorrido na Primeira Escola de Verão da Didática das Matemáticas, realizado em Chamrousse de 7 a 19 de julho de 1980, nos apresenta uma ferramenta de análise que visa a compreensão do processo de fabricação dos objetos de ensino: a *Transposição Didática*¹¹⁶ (TD). A TD é, para o didata, uma ferramenta que permite recapacitar, interrogar certas evidências, pondo em questão idéias simples, desprendendo-se da familiaridade enganosa do seu objeto de estudo.

Segundo CHEVALLARD¹¹⁷,

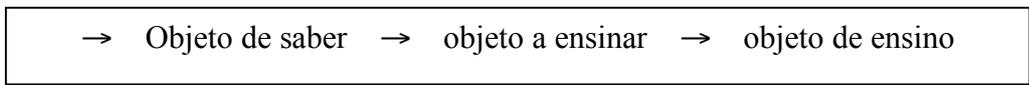
A passagem de um conteúdo de saber formal em uma versão didática desse objeto de saber pode ser chamado mais apropriadamente de Transposição Didática 'stricto sensu'. Mas o estudo científico do processo de Transposição Didática supõe levar em conta a Transposição Didática 'lato sensu', representada pelo esquema (vide

¹¹⁵ CHEVALLARD (1991)

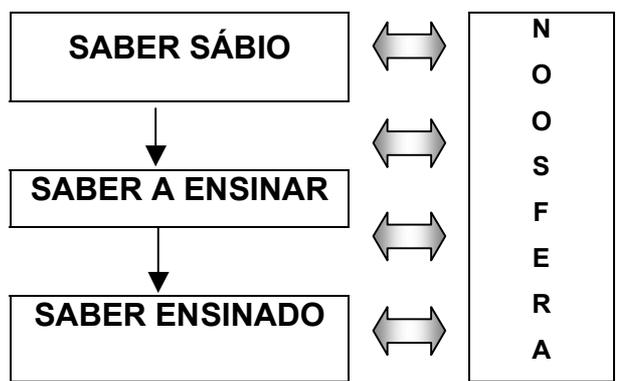
¹¹⁶ O conceito de transposição didática já havia sido desenvolvido para outros fins pelo sociólogo Michel Verret em 1975

¹¹⁷ CHEVALLARD (1991), p. 46

abaixo) no qual a primeira seta indica a passagem implícita para a explícita, da prática à teoria, do pré-construído ao construído.



Ao analisar a forma como conteúdos de matemática aparecem no currículo escolar, o autor define três esferas de saber: o *saber sábio*, construído e desenvolvido no âmbito da comunidade científica; o *saber a ensinar*, presente nos programas e livros didáticos; e o *saber ensinado*, que é comunicado na sala de aula pelo professor. Esquematizando esses *patamares*, temos:



Segundo CHEVALLARD¹¹⁸,

*Um conteúdo de saber que foi designado como saber a ensinar, sofre a partir de então um conjunto de transformações adaptativas que vão torná-lo apto para ocupar um lugar entre os **objetos de ensino**. O “trabalho” que transforma um objeto de **saber a ensinar** em um objeto de ensino, é denominado de **transposição didática**.*

As mudanças sofridas pelo saber ao longo de seu percurso desde o âmbito científico até a escola são determinados por fatores externos ao sistema escolar, personificados na figura de atores que influenciam o rumo do ensino: *a noosfera*.

¹¹⁸ CHEVALLARD (1991), p. 45.

A noosfera compreende todos aqueles que contribuem para que o saber sábio sofra as transformações necessárias até chegar à sala de aula. Membros da própria sociedade, como pais e diretores de escolas atuam mais diretamente nos arredores do saber ensinado. Autores de livros didáticos (que também podem ser pais) e de artigos de divulgação, por exemplo, ajudam a definir quais dos saberes sábios farão parte do currículo escolar e serão tratados em sala. Membros do Ministério da Educação e políticos de uma forma geral, também contribuem na seleção e na forma com que os conteúdos deverão ser transpostos.

De uma forma dinâmica, saberes e sociedade interagem ao longo dos vários patamares ocupados pelo saber.

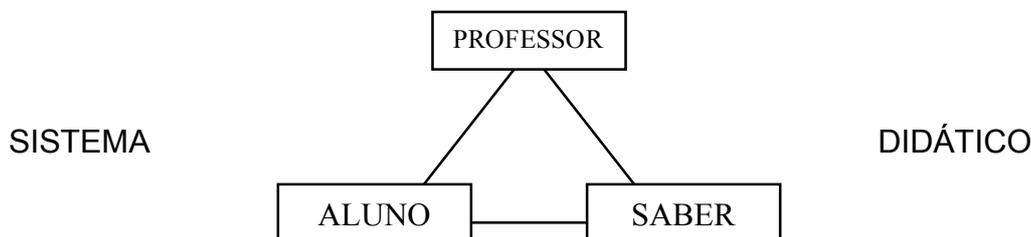
Chevallard afirma que por muito tempo as relações existentes entre sociedade e sistema didático - entendido até então como sendo composto pelo professor e pelo aluno, e até mesmo pelo interior deste último - eram extremamente difíceis de serem analisadas. Conseqüentemente, era também difícil superar os conflitos aí existentes, na medida em que ambos eram compostos exclusivamente por pessoas. Desta forma, o fato do ser humano ser falho, possuir imperfeições, refletia nas atitudes e na realidade desses dois domínios. O ensino estava completamente vulnerável ao livre-arbítrio daqueles que o compunham e/ou influenciavam. Segundo ele,

*O mundo – ou melhor esta miniatura: o sistema educativo -, dado que é uma obra humana... não seria mais que o fruto de nossas vontades e de nossos caprichos. De nossas vontades, certamente, às vezes insustentáveis; de nossos caprichos, com freqüência egoístas, que deveríamos reencaminhar. Deveríamos trabalhar precisamente para isso.*¹¹⁹

O que faltava para que pudéssemos compreender melhor o funcionamento dessa relações, aponta Chevallard, era um elemento até então tido como alheio

¹¹⁹ CHEVALLARD (1991), p. 14.

ao processo: o **saber**. O sistema que até então era composto apenas por dois elementos, agora incorpora um terceiro¹²⁰:



*Sem dúvida, parece um esquematismo bruto mas tem a virtude principal de afastar as perspectivas parciais nas quais se tem buscado durante demasiado tempo e de forma ineficaz uma explicação satisfatória dos fatos melhor comprovados: tal como a famosa “relação professor-aluno” que tem obscurecido, durante pelo menos duas décadas, o estudo dos fatos didáticos mais imediatamente transparentes.*¹²¹

O fato de incluir esse terceiro componente, até então esquecido, possibilita-nos refletir sobre questões cruciais como, por exemplo, as alterações que um certo conteúdo escolar sofre desde a sua extração do contexto científico até a sua chegada à sala de aula ou, ainda, as implicações que a alteração do currículo propicia no sentido de harmonizar as relações entre Sistema Didático (SD) e sociedade. Essas são possibilidades não só avistadas, mas fundamentais para o nosso trabalho.

III.3 - OS PATAMARES DO SABER

Como vimos anteriormente, o saber passa por vários processos transformadores que alteram a sua natureza para que se torne *ensinável*. O conhecimento produzido pelo cientista é divulgado em artigos e congressos, por exemplo, como alheio ao seu formulador, por ser-lhe atribuído um formato

¹²⁰ Esquema apresentado por CHEVALLARD (1991), p. 26.

¹²¹ CHEVALLARD (1991), p. 15

universal, impessoal. A partir do momento que este é aceito pelos pares, passa a fazer parte do saber sábio, o primeiro patamar.

Alguns desses saberes pertencentes à esfera dos sábios, serão escolhidos para compor os currículos escolares e integrar os livros didáticos. Nesta transição, outras transformações se processarão, como a desincretização, através da qual o saber eleito perde vínculos antes estabelecidos com outros saberes, sejam eles pertencentes à mesma área do conhecimento ou não. O resultado dessa, dentre outras transformações, é o saber a ensinar, que constitui o segundo patamar.

Este Saber a Ensinar servirá de fonte primeira para que os professores ministrem suas aulas. Temos então, o terceiro patamar: o saber ensinado. Para compreendermos melhor cada etapa desse processo, analisaremos a seguir cada um dos patamares.

III.3.1 - DO SABER SÁBIO AO SABER A ENSINAR

O saber sábio constitui a referência para o saber a ensinar.

Os personagens envolvidos no surgimento e desenvolvimento das teorias científicas, ao comunicarem aos seus pares os seus feitos, o fazem como citamos anteriormente, de forma *despersonalizada* e impessoal. Na despersonalização, o sujeito da pesquisa, com seus motivos pessoais, desaparece. Concomitante a esse processo, a publicação é, a priori, *descontextualizada* e, a posteriori, *recontextualizada* para que o conhecimento produzido seja justificado. A necessidade de apresentar este conhecimento de forma organizada, acaba inevitavelmente, por romper as antigas ligações do saber, estabelecendo novas ligações; temos então a desincretização.

O conhecimento, quando é divulgado de forma universal, impessoal, seguindo uma construção lógica e formal, resulta no desaparecimento da história da pesquisa. Se antes a pesquisa estava conectada a uma determinada problemática e imersa num contexto, agora seus resultados passam a ser aplicáveis a outros problemas, sem qualquer ligação com sua origem. Temos então os três “ds” e um “r” do processo de produção de saberes a ensinar: **despersonalização**, **descontextualização**, **desincretização** e a **recontextualização**. O fruto desta comunicação serve de referência para o saber a ensinar.

Deste *saber sábio* já modificado, alguns temas irão compor o segundo patamar: o saber a ensinar. Para que isso ocorra, estes devem ser ensináveis ou, pelo menos, capazes de se tornarem conteúdos escolares. Segundo Michel Verret¹²²,

uma transmissão escolar burocrática supõe, em relação ao saber:

1 – a divisão da prática teórica em campos de saber delimitados que dêem lugar a práticas de aprendizagem especializadas, ou seja, a desincretização do saber.

2 – em cada uma dessas práticas, a separação do saber e da pessoa, ou seja a despersonalização do saber.

3 – a programação dos aprendizados e dos controles, segundo as seqüências racionalizadas que permitem uma aquisição progressiva dos conhecimentos dos especialistas, ou seja, a programabilidade da aquisição do saber.

A *desincretização*, ocasionada pela extração do saber de seu ambiente epistemológico, gerará os saberes parciais, cada um dos quais se expressa em um discurso autônomo. Este processo nem sempre faz parte da consciência da noosfera que atua ao longo dessa transição, a saber, os autores de livros textos ou manuais didáticos; os especialistas da disciplina ou matéria e os técnicos governamentais; os professores; e ainda a opinião pública em geral, através do poder político, que influencia de algum modo o processo de transformação do saber. Segundo Chevallard, isto fica explícito quando:

*... os autores de livros didáticos justificaram suas “escolhas” (condicionadas pelos requisitos estruturais do sistema didático) por meio de razões contingentes do tipo “os limites estreitos da presente obra”, “o espírito desta coleção”...*¹²³

¹²² VERRET (1975) pp. 146-147.

¹²³ CHEVALLARD (1991), p. 70.

Se, em sua origem, um conhecimento está imerso numa rede conceitual onde cada conteúdo está conectado a uma outra área ou outra teoria, a transposição gera uma rede epistemológica específica, limitada ao contexto escolar.

Para que todas essas transformações citadas acima componham os currículos, os manuais ou ainda os livros-texto, se faz necessário que as peças deste enorme quebra-cabeça sejam reunidas de uma forma harmoniosa, com início, meio e fim. Essa arte de reagrupar os pacotes de saber extraídos na fonte científica se concretizará na chamada *textualização do saber*.

Isso pressupõe que a rede de saberes montada se transforme em um texto. Em geral, o fruto da textualização é a *linearização dos saberes*, já que deve existir uma seqüência de passos a serem percorridos ao longo do ensino de um determinado conteúdo. Essa linha progressiva e cumulativa pode ser facilmente visualizada quando abrimos um livro texto e nos deparamos com o índice de conteúdos a serem trabalhados pela disciplina escolar.

As diferentes opções de montagem do quebra-cabeça dão surgimento aos diferentes programas curriculares e às diferentes seqüências didáticas apresentadas nos manuais.

*Os conteúdos de saberes designados como aqueles a ensinar (explicitamente: nos programas; implicitamente: pela tradição, evolutiva, da interpretação dos programas), em geral preexistem ao movimento que os designa como tal. No entanto, algumas vezes (e pelo menos mais do que se poderia crer) são verdadeiras criações didáticas, suscitadas pelas “necessidades do ensino”.*¹²⁴

Todas essas deturpações fazem com que os saberes transformados sejam completamente diferentes do seu original e, por isso, o *saber a ensinar* é tido como um outro patamar. Não existe uma mera simplificação ou uma redução do *saber sábio*, pois uma nova rede de pacotes de saber é construída. ASTOLFI¹²⁵ corrobora nossa colocação afirmando que:

¹²⁴ CHEVALLARD (1991), p. 45

¹²⁵ ASTOLFI (1995), p. 48.

... a designação de um elemento do saber sábio como objeto de ensino modifica-lhe muito fortemente a natureza, na medida em que se encontram deslocadas as questões que ele permite resolver, bem como a rede relacional que mantém com os outros conceitos.

A escola, na verdade, nunca ensinou saberes em estado “puro”, mas conteúdos de ensino que resultam de cruzamentos complexos entre uma lógica conceitual, um projeto de formação e algumas exigências didáticas. Deste ponto de vista, as transformações sofridas na escola pelo *saber sábio* devem ser interpretadas menos em termos de degradação ou desvio e mais em termos de necessidade constitutiva.

III.3.2 - O SABER ENSINADO E SUAS RELAÇÕES COM O SISTEMA DIDÁTICO

O professor, ao implementar o *saber a ensinar* - materializado nos currículos e livros didáticos - no Sistema Didático, configura o *saber ensinado*.

A transposição realizada agora é dita *transposição interna*, pois será realizada pelo professor dentro do sistema de ensino no intuito de ministrar os conteúdos estabelecidos no *saber a ensinar*. Esta transposição será concretizada em sua prática na sala de aula. O nome *transposição interna* vem contrastar com a dita *transposição externa*, que foi tratada até a etapa anterior deste trabalho, quando descrevíamos as modificações ocorridas na transição entre *saber sábio* e *saber a ensinar*, realizada pelos divulgadores, autores de livros didáticos e programas curriculares.

Vale a pena ressaltar que os responsáveis pela *transposição externa*, que resultará nos livros-texto para o Ensino Médio, se diferenciam substancialmente daqueles que se dedicam ao ensino universitário, na medida em que o *sistema didático universitário* se diferencia do *sistema didático do Ensino Médio*. Em particular, a relação professor-aluno e os objetivos a serem alcançados pela formação do aluno são profundamente diferentes nestes dois níveis. A universidade se aproxima bastante do contexto em que o *saber sábio* é

produzido, e nela a formação dos alunos se dá em busca de um novo profissional atuante em áreas próximas a estes saberes. Já o Ensino Médio se encontra distante da comunidade científica e busca a formação geral do cidadão. Pretende-se, em tese, que ele consiga compreender e interagir minimamente com o mundo que o rodeia. Dentro desta perspectiva, a *textualização do saber* ocorre com menos transformações no primeiro domínio quando comparado com o segundo. Isto se deve à proximidade/afastamento dos domínios em relação às áreas de produção dos saberes.

Quando analisarmos os livros didáticos do ensino médio, veremos que para a maior parte dos conteúdos apresentados nos livros do Ensino Médio – mais especificamente os referentes à física clássica -, a *textualização do saber* se resume a uma simplificação da apresentação contida nos livros universitários.

Pinho¹²⁶ nos mostra que:

Esta simplificação se manifesta na linguagem utilizada na conceituação e se estende no que se refere aos recursos matemáticos utilizados, bem como nas eventuais demonstrações matemáticas. Quanto à apresentação dos conceitos, a simplicidade vai ao extremo e pode ser percebida na seqüência ordenada do conteúdo, descaracterizando o processo histórico de sua elaboração

Portanto, enquanto durante a preparação dos livros didáticos universitários existe uma transposição “real”, de fato, o mesmo não se dá em relação ao Ensino Médio. Quando conteúdos de física são selecionados no saber sábio para fazerem parte do saber a ensinar universitário, estes passam por todos os processos de transformação descritos anteriormente, como a desincretização e a despersonalização. Portanto, embora o ambiente escolar universitário esteja próximo à comunidade científica, a forma de apresentação dos conteúdos difere significativamente da história da pesquisa original.

¹²⁶ PINHO (2000), p. 230.

No entanto, comparando os livros didáticos do Ensino Médio com os universitários, vemos que a física clássica apresentada no primeiro caso se reduz a uma simplificação na linguagem (matemática ou científica) e nos conceitos. Dizemos então que, neste último caso, não houve uma transposição “real”, uma vez que esse material simplificado será o apoio e a referência para que o professor desempenhe seu papel na sala de aula. É exatamente neste novo espaço, o da preparação e do lecionar, que se estabelece o terceiro patamar do saber – o saber ensinado.

Chevallard, no trecho selecionado abaixo, atenta para uma característica importante da prática docente no contexto da sala de aula: a legitimação do saber através da despessoalização.

*O saber que produz a transposição didática será portanto um saber exilado de suas origens e separado da sua produção histórica na esfera do saber sábio, legitimando-se (...) como algo que não é de nenhum tempo nem de nenhum lugar, e não (...) mediante o recurso da autoridade de um produtor, qualquer que seja.*¹²⁷

A função da despessoalização no *saber ensinado*, então, assume um papel diferente daquele incorporado no *saber sábio*. No primeiro patamar, sua função era a da difusão do saber e, a partir dali, da produção social de conhecimento. Mas, no seio do funcionamento didático, a função assumida é completamente diferente: trata-se aqui da reprodução e da representação do saber, sem estar submetido às mesmas exigências de produtividade. O jogo do saber adota agora um aspecto totalmente diferente. A didática entra nessa relação como uma forma de otimizar as conexões do aluno, frente as informações que se deseja repassar.

Essa *legitimação do saber*, bem como todos os processos da *transposição interna*, tem como objetivo a adequação do *saber a ensinar* ao sistema didático. Chevallard¹²⁸, à respeito da inclusão do saber no sistema didático, afirma:

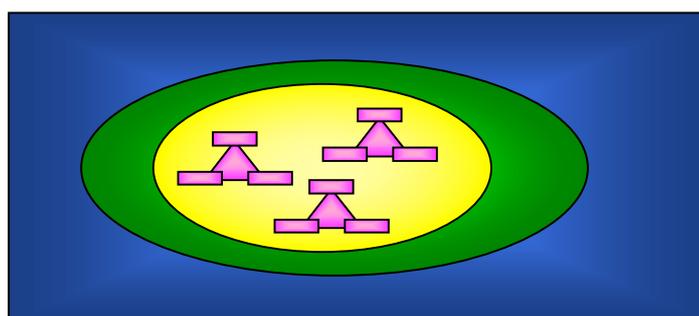
¹²⁷ CHEVALLARD (1991), p. 18.

¹²⁸ Idem p.16

O Sistema Didático não é mais fruto de nossa vontade, pois seu funcionamento – sem falar sequer de seu bom funcionamento - supõe que a “matéria” (professor, alunos, saber) que irá ocupar cada um dos lugares, satisfaça certos **requisitos didáticos** específicos. Para que o ensino de um determinado elemento de saber seja meramente **possível**, esse elemento deve ter sofrido certas deformações, que o tornarão apto para ser ensinado. O saber-tal-como-é-ensinado, o saber ensinado, é necessariamente distinto do saber-inicialmente-designado-como-o-que-deve-ser-ensinado, o saber a ensinar...

Neste trecho, Chevallard denota a inevitabilidade da transformação do saber até chegar à sala de aula, frente à necessidade de adequação do saber ensinado ao Sistema Didático.

No entanto, este não é o único processo que ocorre no Sistema Didático, pois não podemos esquecer que este não se encontra isolado. O *sistema didático* é um sistema aberto e, para que este sobreviva, deve ser compatível com o meio. Chevallard¹²⁹ representa essa relação através do esquema abaixo:



- | | | | |
|---|----------|---|----------------------------------|
|  | Entorno |  | Sistema de Ensino, stricto sensu |
|  | Noosfera |  | Sistema didático |

Nesta figura, podemos perceber que os *sistemas didáticos* encontram-se circundados pelo *sistema de ensino*, que reúne o conjunto de sistemas didáticos e

¹²⁹ Ibidem, p. 28.

tem um conjunto diversificado de dispositivos estruturais que permitem o funcionamento didático e que intervêm no *sistema didático* em diversos níveis. Inclui, por exemplo, oficiais que regulam os fluxos de alunos entre os sistemas didáticos, assegurando a formação do conjunto de SD de modo viável.

O *sistema de ensino* possui, por sua vez, um entorno denominado *noosfera*. Esta esfera comporta desde os representantes do sistema de ensino, com ou sem mandato (desde o presidente de uma associação de ensino até um simples professor militante), até os representantes da sociedade (os pais de alunos, os especialistas da disciplina e os emissários dos órgãos políticos). Estes dois nichos interagem por meio de uma fronteira composta por todos aqueles que ocupam os postos principais do funcionamento didático, se enfrentam problemas que surgem do encontro com a sociedade e suas exigências; ali os conflitos se desenvolvem e se resolvem via negociação.

Chevallard,¹³⁰ a respeito dessa fronteira, expõe:

Toda uma atividade ordinária ocorre ali, fora dos períodos de crise (em que esta se acentua), sob a forma de doutrinas propostas, defendidas e discutidas, de produção e de debates de idéias – sobre o que poderia se modificar e sobre o que convém fazer – Em resumo, estamos aqui na esfera de onde se pensa – segundo modalidades talvez muito diferentes – o funcionamento didático.

Nos momentos de crise, em que são discutidas modificações no ensino, uma série de saberes sábios concorrem pela sua inserção no contexto escolar. A noosfera fica mais evidente, pois cabe a ela decidir qual deles deve ou não ser selecionado, seguindo os critérios apontados anteriormente.

¹³⁰ idem

III.4 - A TEMPORALIDADE AO LONGO DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA

Através da prática científica, o *saber sábio* é construído e legitimado. No entanto, isso não ocorre de forma imediata, existindo, portanto, um lapso de tempo associado a esse processo que foi denominado *tempo real*. A própria Teoria da Relatividade Geral, proposta em 1915 por Einstein – cientista já reconhecido na época por contribuições importantes - não foi aceita de imediato. Vimos que o eclipse ocorrido na cidade de Sobral (CE) em 1929 teve um papel importantíssimo na consolidação e aceitação dessa teoria. As indas e vindas, as reformulações das teorias, os testes ocorridos ao longo de sua formulação não são de nosso conhecimento. O desconhecimento do *tempo real*, em geral, não é motivo de preocupação nossa, na medida em que nos interessamos apenas pela versão final da teoria e pelo fato desta já estar bem estabelecida no cenário científico.

No entanto, este *tempo real* que, a priori foge do nosso escopo, servirá de referência e deverá ser levado em conta durante o processo de transposição. Afinal de contas, a noosfera deverá, de alguma forma, transformar o *tempo real* em *tempo lógico*, que corresponde a um certo tempo de caráter artificial, que oferece uma justificativa temporal para a seqüência e ordenação dos conteúdos que compõem o *saber a ensinar*. Os processos de despersonalização, descontextualização e desincretização, que concedem ao *saber a ensinar* uma configuração dogmática, fechada, ordenada, cumulativa e linearizada, necessitam também oferecer uma idéia da temporalidade deste saber. O *tempo lógico* denotará, portanto, a importância que cada objeto de saber deve ocupar dentro do currículo.

O estabelecimento do *tempo lógico* presente no currículo reflete os objetivos a serem alcançados com aqueles conteúdos, isto é, se os componentes da *noosfera* entendem, por exemplo, que a Física tratada no ensino médio deve ser concebida como uma amostragem de todos os grandes feitos nessa ciência, com certeza o espaço destinado ao ensino de Física Moderna será diferente daquele que seria atribuído a esse mesmo conteúdo se a Física fosse encarada como um “retrato fiel” da sua história. De acordo com a primeira concepção, a Física Moderna comporá um espaço significativo no currículo escolar, na medida em que

representa uma das etapas mais importantes do desenvolvimento das teorias científicas. No entanto, pela segunda concepção, a Física Moderna não ultrapassaria alguns momentos no final do Terceiro Ano do Ensino Médio, na medida em que o *tempo real* da Física Moderna é ínfimo se comparado ao da Física Clássica.

A adequação entre *tempos* diferentes não se encerra por aqui, pois na etapa seguinte da *transposição*, nos deparamos com outra compatibilização: a do *tempo lógico* com o *tempo didático*.

A primeira prática do professor, antes mesmo do início do período letivo, é a de tentar compatibilizar o *tempo lógico*, apresentado nos livros por exemplo, com o tempo disponível para se trabalhar os conteúdos (na sua programação anual), gerando então o *tempo didático*. Enquanto no *saber a ensinar*, os autores de livros-texto, e as comissões do ministério da Educação responsáveis pela legislação e elaboração do currículo são os responsáveis pelo estabelecimento do *tempo lógico*, apenas o professor deve realizar a tarefa de estipular o *tempo didático*.

Transformar os textos didáticos em aulas dadas é a conversão que o professor deve fazer ao montar o programa da disciplina ao longo do ano. Destinar um bimestre à abordagem das Leis de Newton, por exemplo, é um exemplo típico e usual da abordagem dos professores do Ensino Médio. Aos conteúdos julgados de menor importância, independente do fato do *tempo real* dele ter sido maior ou menor que o de outras teorias, apenas algumas horas/aulas serão destinadas.

As dificuldades de compatibilização entre *tempos* diferentes não se encerra por aqui, pois existe ainda o *tempo de aprendizagem*, próprio de cada aluno.

Chevallard¹³¹ define este último conceito como sendo o tempo necessário para que o aluno estabeleça as conexões da rede conceitual gerada nele pela TD. Esse tempo, portanto, não tem relação direta com o *tempo lógico*, nem tampouco com o *didático*, pois as imbricações são formuladas pelo aluno a partir das informações transmitidas pelo professor, aliadas à metodologia empregada na abordagem dos conceitos.

¹³¹ CHEVALLARD (1991)

O professor espera que o tratamento linear dos conteúdos, aliado à sua metodologia forneça instrumentos suficientes para que o aluno monte sua própria rede conceitual.

Podemos questionar, no entanto, o porquê da não utilização de uma rede durante o ensino! A questão crucial desse ponto é justamente a impossibilidade do ser humano interiorizar informações que não sejam seqüenciais e lineares. A leitura, ou a visualização de alguma coisa sempre é feita passo-a-passo. Podemos fazer uma analogia com uma rede de pesca, possuidora de vários nós (pacotes), interligados entre si por meios de fios (relações). Para se construir uma rede, temos que fazer um nó de cada vez, mesmo porque até a instrução a respeito de como se faz uma rede é linear e seqüencial – na fala, usamos letra após letra, palavra após palavra.

Esse primeiro fator se concretiza nos livros através do índice dividido por capítulos e sub-capítulos lineares, onde geralmente se parte do mais simples para o mais complexo.

III.5 - PRÁTICAS SOCIAIS DE REFERÊNCIA

Como vimos anteriormente, Chevallard define a Transposição Didática como fruto de dois processos consecutivos que transformam por completo o *saber sábio* até que este chegue à sala de aula. Na sua apresentação original, a TD foi aplicada em detalhes para o saber matemático. De certa forma, tudo o que foi dito anteriormente possui um alto grau de coerência quando adaptado à Matemática. No entanto, a TD se pretende uma teoria de análise didática em geral¹³², ou seja, aplicável a todo o domínio de conhecimento que tenha lugar no sistema de ensino.

Não analisamos, em nenhum momento, detalhes da aplicabilidade ou não desta teoria à Física. Vários pesquisadores atuantes na área de ensino, como Joshua, Martinand e Caillot, entre outros, questionam a aplicação *ipsis literis* da teoria da Transposição Didática a outras disciplinas, sejam elas pertencentes às áreas naturais, como a Física e a Química, ou humanas, como a História e a Geografia, ou ainda pertencentes a áreas técnicas como a Engenharia. Estes

¹³² CHEVALLARD (1991), pp. 14 e 15.

pesquisadores defendem modificações na teoria de Chevallard, quando esta for aplicada a outras disciplinas.

Michel Caillot¹³³ parte da análise realizada por Chevallard sobre o conceito de distância introduzido em 1971 por Fréchet, para questionar a universalidade da Transposição Didática, isto é, a possibilidade de aplicação em outras ciências, como as experimentais, ou de áreas não científicas, como a lingüística.

Na apresentação da TD por Chevallard, ao discorrer a respeito do *saber sábio* ou, de forma mais geral, do saber, somos levados a aceitar duas premissas básicas: que existe um saber sábio de referência, e que ele é o único a guiar o processo de transposição. Diante deste entendimento, Caillot¹³⁴ questiona: “Existe por exemplo um saber em francês ou em línguas secundárias, ou não existe nada mais além das práticas lingüísticas?”.

Uma segunda observação ainda é feita, dessa vez relativa à composição da noosfera e ao seu trabalho específico. Como já detalhamos anteriormente, a noosfera é composta basicamente por autores de livros didáticos, por especialistas da disciplina ou matéria, por técnicos governamentais, por professores, e ainda pela opinião pública em geral, através do poder político, que influencia de algum modo o processo de transformação do saber.

Estes diferentes atores possuem em comum o interesse pela produção de programas e pela introdução de novos objetos de ensino. Para Chevallard, a noosfera seria basicamente um misto de especialistas disciplinares (porta-vozes do saber sábio), técnicos em ensino. No entanto, para Caillot:

...no campo das matemáticas acrescentaríamos basicamente os usuários da matemática, os representantes das empresas, os engenheiros, etc. No domínio das línguas, porque não dizer os jornalistas, os escritores ?¹³⁵

Ou seja, a noosfera extrapolaria o campo estrito do domínio dos sábios em questão e do domínio educacional “stricto sensu”.

¹³³ CAILLOT

¹³⁴ Idem, pp. 21 e 22.

¹³⁵ Ibidem, p. 22.

Por sua vez, Chevallard afirma que a referência última é o saber produzido pela Universidade ou veiculado pelos seus personagens, ou que tenha tido contato forte com a Universidade. É satisfatório pensar que a formação inicial dos professores de matemática e dos inspetores foi realizada na Universidade. No entanto, ter como referência para o saber ensinado o saber sábio, produzido pela comunidade científica, comenta Caillot,

...parece ser uma visão pelo menos limitada, senão contestável como mostra a sociologia do currículo. Os conteúdos de ensino são de fato o fruto das demandas da sociedade e são o resultado de compromissos com a Universidade, com os saberes que ele produz, no entanto, esta última é apenas um dos atores potenciais no jogo da definição dos conteúdos de ensino. Outros atores, cuja influência é subestimada na teoria de Chevallard, aparecem claramente no campo do ensino profissional e tecnológico, ou ainda durante uma confecção mais sutil no campo das ciências experimentais como veremos a seguir.¹³⁶

As críticas apontadas por Caillot, portanto, não são direcionadas à teoria da Transposição Didática aplicada à Matemática, e sim à sua utilização como ferramenta de análise para outras disciplinas. A teoria da Transposição Didática, da forma com que é apresentada por Chevallard, possui um domínio de validade limitado à Matemática. Independentemente das críticas originárias da sociologia do currículo, que afirma que outras forças que não aqueles representantes do saber acadêmico contribuem na definição de um programa de ensino, as críticas aqui abordadas se remetem à existência de um saber sábio como referência última para o saber a ensinar. Deve-se considerar o fato de que existem saberes ligados às práticas sociais, inclusive a linguagem, que não pertencem fortemente ao saber acadêmico elaborado pela comunidade científica.

Este ponto já era tratado por Martinand¹³⁷, quase na mesma época em que Chevallard propôs sua teoria. Ao ser encarregado da elaboração de um novo currículo para o curso científico e técnico, apontava outras referências possíveis

¹³⁶ Idem, pp. 22 e 23.

¹³⁷ MARTINAND (1986)

(além do saber sábio) para o delineamento do saber a ensinar. Foi assim que avançou a idéia de que as práticas sociais também poderiam ser fonte de legitimação dos conteúdos do ensino, participantes ativas no processo de TD. Estas práticas que serviam de referência para a elaboração dos conteúdos a ensinar foram chamadas por Martinand *práticas sociais de referência* (PSR).

As PSR podem ser múltiplas, como as atividades técnicas do engenheiro, as práticas domésticas e as práticas culturais, e as escolhas econômicas e até mesmo políticas, que de fato irão influenciar as escolhas didáticas dependem da sociedade na qual estão inseridas.

No caso dessas práticas, fica claro o seu afastamento do Saber Sábio, pois os conhecimentos a serem ensinados são conhecimentos em ação que eram, na maior parte dos casos, difíceis, senão impossíveis de serem formalizados. Pensemos, por exemplo, na dificuldade que um expert em ourivesaria terá ao exprimir o seu saber-fazer. O mesmo ocorre, por exemplo, com os saberes domésticos, onde o retorno ao manuseio é importante. Esse tipo de saber não tem a mesma natureza que os saberes sábios, mesmo se o saber-fazer também existe neste último. Mas o saber-fazer incorpora, muitas vezes, procedimentos de algoritmos que trouxeram sua justificação no Saber Sábio.

Quando consideramos as *práticas sociais de referência*, as escolhas feitas na definição dos conteúdos não dependem mais somente da racionalização trazida pelo saber acadêmico, mas são fruto também de fatores sociais múltiplos que não são levados em conta pela teoria de Chevallard. Para Chevallard, apenas parte dos saberes originais é transposta ao contexto da sala de aula devido à preocupação com a aplicabilidade do *saber a ensinar*. Segundo seu ponto de vista, os critérios utilizados para fazer a seleção dos conteúdos são basicamente três: o conteúdo deve responder a um projeto social, deve ser ensinável, e ainda avaliável.

Os dois últimos critérios são claramente vinculados ao Saber Sábio e às necessidades do Sistema de Ensino.

Ser ensinável significa ser capaz de gerar atividades coerentes com o ambiente de sala de aula, atendendo à necessidade dos professores de promover atividades práticas, avaliações e justificar o ensino daquele conteúdo, e à dos alunos de fazer as atividades para ir bem nas avaliações.

Dizer que o ensino deve ser ensinável, implica na possibilidade de apresentar ao aluno os conceitos e os formalismos compatíveis com a sua idade e nível de compreensão. Para tanto, os pacotes de saber devem sofrer modificações tanto na linguagem, já que a comunidade científica possui termos próprios, quanto na forma, na medida em que os parâmetros utilizados na justificação e conceituação do novo saber são diferentes do original.

Esse novo saber, ensinável, deve ser potencialmente capaz de gerar atividades típicas do funcionamento didático, isto é, deve-se submeter à operacionalização e à verificação direta do conhecimento do aluno. Isso significa dizer que o saber poderá ser exercitado e posteriormente avaliado na forma de exercícios para que a sua aplicação no sistema didático não gere dúvidas nem conflitos. Todo “bom” livro de física e de matemática é repleto de exercícios de fixação, problemas de aplicação, testes propostos, entre outros. Astolfi¹³⁸ reafirma essa colocação dizendo que:

A seleção vai ocorrer a partir da facilidade particular de certos conteúdos para gerar um número grande de exercícios ou atividades didáticas, até mesmo quando estes são nitidamente descontextualizados quanto a sua função, em relação ao conceito original.

O fato da cinemática responder muito bem a essas duas exigências, fez com que ela fosse inserida no currículo de física e que, desde então, não tenha sofrido modificações. A cinemática se reduz basicamente à *matematização da matemática*, isto é, poucos são os conhecimentos físicos abordados nessa parte da disciplina, a despeito do alto número de ferramentas matemáticas utilizadas em sua compreensão. Em geral, até a queda-livre, que poderia gerar discussões históricas ou ainda de ordem mais epistemológica, acaba se resumindo à mera aplicação de exercícios que exploram a relação entre altura, velocidade e aceleração. A infinidade de exercícios possibilitada pelas equações referentes a esse movimento acabam sufocando o sentido físico do fenômeno. Esse mesmo

¹³⁸ ASTOLFI (1997), p. 183.

fato não é diferente no tratamento da ótica geométrica ou mesmo dos circuitos elétricos (resistência ou capacitores em paralelo e série).

A “avaliabilidade” se refere à forma mais comum de legitimação do processo ensino/aprendizagem. É através dela que professores e alunos verificam seu êxito no desempenho de seus papéis no Contrato Didático¹³⁹.

Assim, o fato de ser ensinável e avaliável não extrapola os limites da academia. A insistência de Chevallard de que o Saber a Ser Ensinado deve responder a um projeto social poderia indicar uma preocupação em contemplar as necessidades da sociedade como um todo. No entanto, parece-nos que o projeto social aqui mencionado acaba sendo definido pela noosfera que, para Chevallard, não possui representantes outros que aqueles do Saber Sábio e da área de ensino. Ou seja, a área acadêmica acabaria por definir o projeto social ao qual a TD deveria responder, fechando o ciclo de endogenia.

Mas analisando com um pouco mais de detalhe o Saber Físico a Ensinar, percebe-se a influência, em vários tópicos, das PSR mencionadas por Martinand. No estudo da ótica geométrica há toda uma discussão sobre a “equação dos fabricantes de lentes”. Da mesma forma, na parte reservada ao eletromagnetismo, o estudo dos transformadores é contemplado pelo seu uso difundido nas atividades de engenharia e mesmo no cotidiano doméstico. Não é raro encontrar a discussão do empuxo associada aos calados de navios e barcos.

Hoje, mais do que no passado, é flagrante a influência das PSR no Saber a Ensinar em Física. Várias obras didáticas fazem questão de anunciar seus compromissos com o mundo das tecnologias, da História, do cotidiano, etc. Estes anúncios são apenas parcialmente verdadeiros, pois continua-se a propor conteúdos físicos, sendo que eles são selecionados e transpostos por critérios também exteriores ao Saber Sábio, isto é, envolvendo as PSR.

Na verdade, Martinand¹⁴⁰ usa o termo PSR para criticar a mera textualização do saber:

Deve-se, de maneira inversa, partir de atividades sociais diversas (que podem ser atividades de pesquisa, de engenharia, de produção, mas

¹³⁹ BROUSSEAU (1986)

¹⁴⁰ MARTINAND (1986)

também de atividades domésticas, culturais...) que possam servir de referência a atividades científicas escolares, e a partir das quais deve se examinar os problemas a resolver, os métodos e atitudes, os saberes correspondentes.

Ao se passar para o Saber Ensinado, a referência a estas práticas sociais deve vencer um obstáculo: a idéia implícita que os professores de Física têm de que são físicos que ensinam. Por terem a sua formação no seio da comunidade científica, acreditam que devem desenvolver atividades características desse meio. Sentem-se na obrigação de se tornarem porta-vozes da comunidade acadêmica.

Neste sentido, os cursos de formação de professores têm papel fundamental para que uma ligação natural e desejável entre o Saber Sábio e as PSR não se rompa.

CAPÍTULO 4

A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DA TEORIA DA RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO

IV.1 - INTRODUÇÃO

Iniciaremos este capítulo analisando, a partir da Transposição Didática, como a TRR é apresentada em alguns livros didáticos. Os livros focalizados serão aqueles de Física destinados ao Ensino Médio e aos cursos universitários básicos. Em geral, a forma de apresentação dos conteúdos nos livros do EM segue de muito perto a apresentação feita nos livros universitários, como discutimos no capítulo anterior. A relação de simplificação do formalismo que se observa entre eles é fruto de um longo processo de mútua adaptação entre conteúdo físico e sistema de ensino. A Transposição Didática define os contornos nos quais este processo se opera, evidenciando que muitos elementos externos ao domínio do Saber Sábio dele participam. Em particular, a ação da Noosfera e sua interação com o sistema de ensino, num primeiro momento, e com o sistema didático posteriormente, acaba por gerar o perfil daquilo que permanecerá no Saber a Ensinar. Tal saber, um produto histórico destas adaptações à sala de aula definem aquilo que conhecemos como “conteúdos tradicionais do ensino de Física” .

Se para conteúdos velhos ou tradicionais o processo de transposição já se encontra suficientemente sedimentado, com formas canônicas de apresentação como no caso das leis de Newton, da hidrostática ou da eletrodinâmica, o mesmo não deve acontecer para os conhecimentos modernos e contemporâneos. Realizamos um levantamento de artigos de pesquisa em ensino de Física que apresentam propostas de introdução da Teoria da Relatividade. Estas são em número maior que 10, e dos mais variados tipos. Elas se diferenciam na forma, na profundidade, no público alvo, conseqüentes das diferentes concepções sobre o ensino de Física e seu papel.

Embora existam várias classes de proposições, separamo-las em dois grandes blocos: o primeiro denominado “estórico-experimental” e o segundo “filosófico-cognitivo”.

A abordagem estórico-experimental abrange propostas de ensino cuja metodologia está centrada em uma estória da física que evidencie a transição do clássico para o relativístico e/ou experimentos responsáveis pelo surgimento da teoria einsteniana. STRNAD¹⁴¹, por exemplo, separa sua proposta em quatro momentos principais. No primeiro analisa uma reação nuclear levando-se em conta a conservação de energia. O incremento na energia, aliado a um decréscimo da massa das partículas envolvidas é utilizado para se chegar à constante de proporcionalidade entre massa e energia (c^2).

No segundo momento, introduz a energia total da partícula como a soma da cinética mais a residual(mc^2). Para partículas com velocidades baixas, obtém-se a energia cinética newtoniana. No terceiro passo, utiliza uma experiência de pensamento, na qual uma fonte de luz emite um pulso que é refletido por um espelho e retorna à sua origem. Analisa o experimento a partir de dois trens, um que se encontra parado e outro que se movimenta. Levando em consideração que a velocidade da luz nos dois referenciais deve ser a mesma, consegue obter as equações de dilatação do tempo e contração do espaço (Transformação de Lorentz). Apenas no quarto passo, que por sinal é tido como opcional, é que os novos conceitos de espaço-tempo são refletidos sob uma forma mais conceitual. Segundo STRNAD, os três primeiros momentos são tidos como:

...mecânica relativística sem relatividade. O estudante não apreende a teoria da relatividade especial como um todo. No entanto, levando em conta o curto espaço de tempo dedicado à física em geral e à relatividade especial, isso(a proposta) aparece como sendo a única forma possível.

A opção feita pelo autor de privilegiar o artefato matemático-experimental, isto é, a mecânica relativística sem relatividade, em detrimento dos conceitos relativísticos fica evidente nesta passagem.

¹⁴¹ STRNAD (1979)

ROSSER¹⁴² faz um levantamento das propostas anteriores à década de 70, mostrando que o tratamento adotado partia de cálculos de experimentos que tentavam medir a velocidade da Terra em relação ao éter. A forte ênfase na teoria ondulatória fazia com que os estudantes encontrassem dificuldade em se ajustarem mais tarde à teoria da relatividade especial. Sem os métodos de radar¹⁴³ como pano de fundo, os estudantes confundiam as idéias da utilização de relógios sincronizados, especialmente separados. A mecânica relativística era desenvolvida aplicando-se as Transformações de Lorentz num problema de colisão. Isso deixava os estudantes com uma idéia de que a relatividade especial era pré-requisito para a variação da massa com velocidade e a equação $E = mc^2$. Diante desta complicação no ensino da TRR, a forma com que esse tema foi tratado daí por diante resultou num burilamento caracterizado por 5 modificações básicas.

Todas as modificações realizadas no intuito de aprimorar o ensino da TR, segundo ROSSER, foram direcionadas no sentido de excluir a atenção dada à teoria do éter. Para tanto, era inserida uma noção de fóton e de Mecânica Quântica no primeiro ano da universidade, aliadas a evidências experimentais a favor dos efeitos relativísticos e do uso de demonstrações matemáticas das Transformações de Lorentz (método do radar).

Em contraposição às abordagens expostas nestes dois últimos artigos citados, temos o segundo grande bloco: o filosófico-cognitivo.

Este grupo enfatiza o tratamento conceitual e filosófico da Relatividade no lugar da intensa abordagem matemático-experimental. Em alguns casos, a história é utilizada na contextualização e no entendimento dos processos de ruptura que ocorreram na comunidade científica quando o surgimento da teoria einsteniana se deu.

Kammer¹⁴⁴, por exemplo, opta por uma metodologia aplicada a cursos ligados mais às áreas humanas, onde os alunos estão interessados majoritariamente nas discussões filosóficas e qualitativas. O objetivo desse curso portanto, não é a formação de um cientista, mas de uma pessoa que tenha a

¹⁴² ROSSER (1979)

¹⁴³ Quando esse autor, bem como outros se referem ao método do radar, na verdade, estão se reportando à demonstração das Transformações de Lorentz a partir da análise de um pulso de luz que é emitido em várias direções numa nave que se desloca com velocidade próxima à da luz.

¹⁴⁴ KAMMER (1973)

física, e sobretudo a física moderna, como cultura, fornecendo conhecimentos fundamentais na compreensão de problemas associados ao cotidiano.

No projeto desse curso, duas abordagens parecem ter mérito, a saber, uma enfatizando a filosofia, e outra enfatizando problemas ambientais. O primeiro semestre acentuou a física deste século, relacionando a natureza do tempo, espaço e matéria com a relatividade, simetria nas leis físicas, e mecânica quântica. O principal resultado seria a familiarização com a filosofia da Física e sua relação com o pensamento humano.

No segundo semestre, foram estudados problemas “reais”, presentes no cotidiano, como por exemplo, a melhoria do trânsito ou do tráfego aéreo.

Podemos dizer que Angotti et al¹⁴⁵ não apenas segue uma perspectiva similar a de KAMMER, como também chegam a um trabalho mais elaborado em relação à discussão filosófica da ciência, pondo como objetivos claros de seu trabalho:

a) fazer o estudante participar do desenvolvimento do pensamento físico (pensamos não ser necessariamente seguida a ordem histórica), criando assim nele a necessidade psicológica de introdução de novos conceitos; b) fazer o estudante exercitar sua habilidade de formular e julgar hipóteses alternativas através de uma análise conceitual de resultados inesperados, desenvolvendo, assim, sua imaginação e faculdade crítica, e preparando-o para situações inesperadas tão bem quanto mudanças nos conceitos fundamentais; c) ensinar o estudante a discutir, a ouvir as outras pessoas, e a viver com algumas incertezas, se expondo, formulando hipóteses, diante o julgamento e as críticas de seus colegas; d) ensinar o estudante a julgar (através de exemplos) as implicações sociais de uma nova tecnologia resultante de um progresso teórico.

Estes autores partem do pressuposto de que o professor não deve fornecer respostas prontas para o aluno, mas propiciar um ambiente que permita ao aluno desenvolver suas habilidades cognitivas de formular possíveis explicações para

¹⁴⁵ ANGOTTI et all (1978)

resultados não explicados por uma teoria. Como um dos resultados das observações em classe, os autores expõem que os alunos corresponderam positivamente aos questionamentos realizados ao longo do processo, embora tenham sentido por parte dos professores uma dificuldade em deixá-los expor suas concepções sem adiantar as respostas.

O tipo de abordagem concretizada por Angotti et al, calcada numa proposta construtivista, desperta no aluno, entre muitos aspectos positivos, a motivação. A separação entre objetivos de conteúdo e de atitude fornece a este curso um enfoque conceitual, onde o conteúdo é fundamental e todo o esforço dos propositores é fazer com que certos conceitos fundamentais estejam entrelaçados e esclarecidos. Isto implica no estabelecimento de uma rede de conceitos estável o suficiente para servir de início para um aprofundamento matemático e para operações mais sofisticadas, dentre as quais, as modificações das atitudes dos alunos.

Mais recentemente, Terrazan (1994) realizou um levantamento sobre a temática do ensino de FMC no Ensino Médio, e utilizou a abordagem, mais especificamente a seqüência didática como critério para sua qualificação.

Ele identificou como três as categorias de abordagens metodológicas para a introdução do assunto, são elas: (i) Explorando os Limites dos Modelos Clássicos; (ii) Evitando Referências aos Modelos Clássicos (não utilizando termos semi-clássicos); e (iii) Escolhendo Tópicos Essenciais.

Essa categorização é também citada por outros autores, como OSTERMANN¹⁴⁶, ALVETTI¹⁴⁷, e CAMARGO¹⁴⁸. Segundo estes, a primeira vertente tem como referencial um modelo construtivista de ensino-aprendizagem na perspectiva da mudança conceitual e metodológica. A segunda, geralmente atribuída às pesquisas de Fischler e Lichtfeldt¹⁴⁹, considera as analogias clássicas utilizadas no início do tratamento da FMC prejudiciais ao entendimento das novas idéias. A terceira, propõe que poucos conceitos de Física Moderna devam ser ensinados no nível médio.

¹⁴⁶ OSTERMANN (1999)

¹⁴⁷ ALVETTI (1998)

¹⁴⁸ CAMARGO (1996)

¹⁴⁹ FISCHLER & LICHTFELDT (1992)

No entanto, em nosso mapeamento das propostas de inserção da TRR, encontramos uma forma adicional, que não é contemplada nas categorias apontadas por Terrazan. ZIGGELAAR¹⁵⁰ é o proponente de tal inovação, ao abordar a Física Moderna precedendo a Física Clássica, e fazendo com que a Física Clássica seja tratada a posteriori como uma restrição da Física Moderna.

Em relação à sua proposta, ZIGGELAAR afirma:

Para um estudante que não está familiarizado com as definições exatas das quantidades dinâmicas, não é mais difícil começar com relatividade e então aplicar a definição no caso especial da dinâmica newtoniana; do que ter definido para esse último caso e depois tê-lo mudado, corrigido e configurado novamente em outra base para um uso mais geral em relatividade.

Algumas das propostas datam da década de 60 e 70, mostrando que a preocupação com a introdução deste conteúdo não se dá apenas hoje, quando a TRR está prestes a se tornar centenária. No entanto, como veremos a seguir, estas propostas não aparecem de forma clara nos livros de Ensino Médio atuais nem mesmo nos livros didáticos. Ou seja, a existência das propostas pode ser entendida como uma resposta do sistema de ensino às pressões exercidas pela noosfera no sentido da atualização curricular.

Será importante, então entender a forma como os livros didáticos do ensino Médio apresentam estes conteúdos e a relação que eles guardam com os livros do meio universitário e com as propostas oriundas das pesquisas em ensino de física.

IV.2 - LIVROS UNIVERSITÁRIOS

Os livros universitários escolhidos para análise foram¹⁵¹:

¹⁵⁰ ZIGGELAAR (1975)

¹⁵¹ utilizaremos o sobre-nome do primeiro autor para identificar os livros analisados.

1. Feynman, Richard Phillips. “The Feynman lectures on physics mainly mechanics, radiation, and heat”. vol. 1, Estados Unidos da América. Fondo Educativo Interamericano, S.A., 1971.
2. Mckelvey, John P. & Grotch, Howard. “Física”. São Paulo: editora Harper & Row do Brasil Ltda. 1981.
3. Tipler, Paul A. “Física”. Rio de Janeiro: editora Guanabara Dois S.A. 1984¹⁵².

O processo de escolha dos livros levou em consideração dois critérios básicos: o fato do livro ser adotado nas principais universidades brasileiras e, apresentar um conteúdo relativamente extenso sobre o assunto¹⁵³, configurando, por exemplo, um capítulo.

O conteúdo presente nestes livros passou por transformações que não se restringem a uma mera redução ou simplificação do saber sábio; um contexto legitimado didática e pedagogicamente foi produzido para que o saber a ensinar pudesse ser inserido no contexto educacional, no caso universitário.

Todos eles estão sujeitos ao processo inevitável da linearização, pelo qual a apresentação dos conteúdos se dá numa forma seqüencial hierárquica.

A estruturação destes três livros está fundada numa divisão por capítulos, tópicos e sub-tópicos. Mckelvey, por exemplo, redigiu uma coleção de livros de física composta por quatro volumes, dentre os quais são abordados, nesta seqüência, os seguintes temas: Medidas, Unidades e Vetores; Mecânica Newtoniana; Fluidos; Termodinâmica; Eletrostática; Eletromagnetismo; Óptica; Relatividade; Física Nuclear e Física Quântica.

A parte destinada ao estudo da Relatividade ocupa um capítulo de seu quarto volume: o de número 27. O autor divide este capítulo em 09(nove) seções, das quais cinco são dedicadas à Relatividade Restrita e os quatro restantes à Física Nuclear.

Pressupõe-se, dessa forma que, à medida que os alunos vão sendo iniciados no formalismo científico, e em suas teorias, o nível de complexidade exigido pode ser maior, pois à medida que o processo de aprendizagem se

¹⁵² A última edição deste livro, de 1995, também foi analisada.

¹⁵³ No momento em que foi feita a seleção, o livro de Física do Halliday não apresentava de forma significativa os conteúdos da TRR, embora em sua mais nova edição isto tenha sido modificado.

efetiva, os alunos vão sendo capazes de elaborar conceitos e raciocínios cada vez mais complexos.

Segundo essa concepção, o tratamento dado aos conteúdos a serem desenvolvidos em sala deve obedecer à elevação gradativa dos graus de dificuldade. A Física Moderna, portanto, não poderia ocupar lugar diferente nesta estrutura, senão no último volume.

Todo esse conteúdo, ao ser apresentado ao aluno, comporta um certo tipo de metodologia. Estes livros atenderiam as atividades e seqüências propostas pelo primeiro tipo de abordagem presente nos artigos de divulgação: a estorico-experimental. Esta identificação pode ser estabelecida, tendo em vista o tipo de recontextualização feita.

No livro de Mckelvey, o processo de recontextualização se dá de forma meramente didática, sem vínculos estreitos com a cronologia histórica. Tomemos, como exemplo, uma discussão a respeito da propagação da luz.

Como a história da óptica indica, no séc. XIX a luz era pensada como uma onda propagando-se através de um meio material, rígido e elástico, definido como éter que preencheria todo o espaço. O éter permitiria a propagação de ondas luminosas transversais com altíssima velocidade, sem no entanto influenciar o movimento dos corpos celestes. Este ente era a base de toda a teoria do eletromagnetismo de Maxwell.

No texto de Mckelvey, a ordem dos fatos é invertida ao apresentar o éter como consequência, e não como base da Teoria Eletromagnética desenvolvida no século XIX:

“A segunda possibilidade, a qual nega o princípio da relatividade, assegura que as equações de Maxwell podem ser corretas em algum sistema especial de referência mas não são corretas em outros sistemas. Isto, por sua vez, levou à suposição de que as ondas eletromagnéticas devem requerer um meio raro e sutil, referido como éter luminífero, para a sua propagação...Mas, embora muitas experiências fossem imaginadas para revelar a presença do éter e explorar suas propriedades físicas, todas elas terminaram em fracasso. A mais famosa destas foi realizada por Michelson e Morley...”

Ao inverter a relação causal destes conceitos o autor procura justificar a preservação da estrutura teórica do eletromagnetismo para no entanto abandonar o conceito de éter. Seria mais difícil justificar estas opções caso tivéssemos de abandonar a causa, mantendo contudo a consequência! Os autores desse tipo de livro, em geral, preferem relacionar a TRR à cinemática ou dinâmica ao invés da teoria eletromagnética, por razões desse cunho. Esta última situação constitui-se numa contextualização diferente da originalmente processada na ciência visto que o problema atacado por Einstein e outros era relacionado aos fenômenos eletromagnéticos e não mecânicos. O título que Einstein dá ao artigo em que divulga a teoria da Relatividade Restrita, em 1905, “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” enfatiza bem este fato.

Feynman também opta por este tipo de recontextualização, quando inicia seu capítulo dizendo que a Mecânica Clássica formulada por Newton foi tida como verdadeira por mais de 200 anos, até que um erro nestas leis foi descoberto e também corrigido. Tanto o erro quanto a sua correção, afirma, foi realizada por Einstein em 1905.

No trecho abaixo, aponta a modificação ocorrida na segunda Lei de Newton, que é baseada na concepção de massa constante:

“sabemos agora que isto não é certo e que a massa de um corpo aumenta com a sua velocidade. Na fórmula corrigida de Einstein, m assume o valor

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v^2 / c^2)}} \quad (15.1)$$

onde a “massa de repouso” m_0 representa a massa de um corpo que não se move e c é a velocidade da luz...”

Ressalta que:

“para aqueles que querem aprender apenas o suficiente desta matéria para poder resolver problemas, isto é tudo o que necessita saber sobre

a teoria da relatividade – modifica-se as leis de Newton introduzindo um fator de correção para a massa-.”

Neste trecho, Feynman não respeita a historicidade científica, já que passa uma idéia errada quando relata essa estagnação da ciência por 200 anos. Isso é prejudicial não apenas do ponto de vista histórico, pois apresenta uma estória artificial, mas principalmente pela imagem errônea do processo científico. Dizer que a ciência permaneceu **estagnada** por 200 anos e que Einstein **descobriu e corrigiu** o erro presente na teoria newtoniana traduz uma idéia de gênios “aperfeiçoadores” de teorias, sem qualquer vínculo com os processos inerentes à pesquisa científica. Além disso, o que Einstein detectou foi um erro muito maior e mais geral e que teve, como consequência, a mudança da visão de massa, assim como do espaço, do tempo, e da simultaneidade. O que Einstein reformulou foi a visão dos cientistas perante conceitos como éter e propagação da luz. Embora mais à frente o autor exponha alguns dos fatos ocorridos durante o processo de formulação da Teoria da Relatividade Restrita, ainda assim a recontextualização por ele realizada não se dá de forma histórica, nem contempla problemas reais nos embates entre Leis de Maxwell e Transformações de Galileu, pois a solução obtida frente aos problemas apresentados parece ser imediata.

Um outro fator que permite o estabelecimento de conexões entre a proposta estórico-experimental e estes livros, se deve à preocupação muito presente, e até certo ponto válida, nos autores de livros universitários básicos na operacionalização dos conceitos e possibilidade de aplicação destes em exercícios ou problemas. O fato de esses livros serem voltados para futuros pesquisadores ou cientistas faz com que este enfoque seja necessário. No entanto, a preocupação excessiva dos autores neste sentido parece fazer com que praticamente não exista uma abordagem mais detalhada dos conceitos e processos relativos ao surgimento das teorias, elementos extremamente importantes na formação de qualquer acadêmico da área. Os experimentos, em especial o de Michelson Morley, são apontados como “experimentos crucis”, através dos quais a teoria do éter foi abandonada e Einstein chegou à formulação de sua teoria.

Mckelvey, por exemplo, ao tratar a Teoria da Relatividade Restrita dedica três dos seus cinco tópicos ao formalismo matemático das Transformações de Lorentz¹⁵⁴ e suas conseqüências no equacionamento do espaço, do tempo e da massa em referenciais inerciais.

Tipler dedica apenas uma de suas dez seções referentes à Relatividade Restrita à apresentação dos conceitos dessa teoria. As outras nove comportam o formalismo matemático e as aplicações das Transformações de Lorentz em casos específicos.

Todos os itens ou tópicos presentes nos livros textos são avaliados de uma forma ou de outra, seja através de exercícios, de problemas ou testes.

Isso mostra a ênfase dada na operacionalização dos conteúdos. Quando vimos no capítulo 3 o porquê da cinemática ainda permanecer no ensino de física do Ensino Médio, um dos pontos presentes na discussão era justamente a operacionalização matemática dos conteúdos e a possibilidade da verificação destes através de avaliações precisas. Os livros universitários não fogem a esta regra. Por isso as Transformações de Lorentz são tão exploradas e até bem operacionalizadas pelos alunos de graduação. Em contrapartida, nos deparamos com a deficiência na clareza dos conceitos fundamentais quando se expõe o aluno a situações em que a interpretação do fenômeno, e não a sua matemática, é importante.¹⁵⁵

Todos os livros atribuem ao experimento de Michelson-Morley a gênese da Teoria einsteiniana e, a tratam como a prova cabal de que a teoria é correta. Vimos no capítulo 2 que Einstein julgava uma teoria pela sua perfeição interna e segundo a sua confirmação experimental. No entanto, isso não significa que os fatos empíricos devem servir de base para a construção de uma teoria, nem tampouco que esta última deva ser verificada experimentalmente, ela deve apenas não contrastar com os resultados experimentais existentes. Segundo Holton:

¹⁵⁴ As Transformações de Lorentz são equações utilizadas na relatividade restrita. A partir delas pode-se calcular os efeitos originários da aplicação da Relatividade em fenômenos ocorridos a velocidades comparáveis à da luz.

¹⁵⁵ PIETROCOLA & ZYLBERSTAJN(1999)

*...do ponto de vista da física relativística, no experimento de Michelson não acontece nada de importante. O resultado é natural, plenamente esperado e trivialmente verdadeiro. O abandono da idéia do éter e a assunção das equações de transformação significavam o desaparecimento de finalidades e do próprio vocabulário para discutir os interesses dos teóricos do éter em relação ao resultado negativo e as possíveis causas da contração.*¹⁵⁶

O artigo de Shankland¹⁵⁷ relata cinco conversas do autor com o próprio Albert Einstein em Princeton. Na primeira entrevista, ocorrida em 4 de fevereiro de 1950, o autor buscava identificar a percepção de Einstein sobre o experimento de Michelson-Morley, e o grau de influência deste aparato durante o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Especial. Ao ser questionado, Einstein respondera que embora houvesse tomado conhecimento do referido experimento através dos escritos de H. A. Lorentz, somente depois de 1905, o fato chamou-lhe a atenção. Em seguida, Einstein complementa dizendo que os resultados experimentais que mais o influenciaram foram as observações sobre a aberração estelar e as medidas de Fizeau sobre a velocidade da luz na água em movimento.

Estudos mostram¹⁵⁸ que muito provavelmente essa importância dada ao experimento de Michelson-Morley se deve a alguns fatores principais. O primeiro deles se refere à frustração da comunidade científica ao obter os resultados nulos do experimento, conjugada com o caráter enigmático da nova teoria. Essa surpresa repentina provocou na época, uma certa perplexidade nos cientistas, de forma que este experimento em especial ficasse em foco durante algum tempo. Quando Einstein finalmente propôs a teoria que previa o resultado nulo, de imediato a conexão foi estabelecida e propagada pelos pesquisadores da época, até mesmo numa tentativa de dar suporte experimental para a Relatividade Restrita. No trecho abaixo, isso fica mais evidente:

...O indubitável resultado dos experimentos de Michelson podia ser visto como fonte de uma base experimental para a compreensão da

¹⁵⁶ HOLTON (1973), p. 259.

¹⁵⁷ SHANKLAND (1963)

¹⁵⁸ VILLANI (1981)

*teoria da Relatividade, que, por outro lado, parecia contrária ao próprio senso comum; a teoria da Relatividade, por sua vez, podia fornecer uma explicação do resultado experimental de Michelson, de forma não artificial ou ad hoc como parecia ser, baseada na suposta contração de Lorentz-Fitzgerald. Isso provou ser um casamento de longa duração.*¹⁵⁹

O segundo fator se deve ao fato de Einstein ter citado em algumas de suas primeiras publicações didáticas o experimento em questão, afirmando que sua teoria explicava de forma muito mais satisfatória os resultados encontrados do que a teoria de Lorentz e Fitzgerald.

O terceiro e talvez mais marcante fator seja a visão “experimentalista” que predominava o ambiente científico da época. Segundo essa visão, uma teoria científica deveria ser necessariamente baseada, logicamente e geneticamente, sobre resultados experimentais. A legitimidade de uma descoberta estaria alicerçada em uma generalização de experimentos particulares.

Todas essas transformações descritas acima valem da mesma forma para os demais conteúdos tratados ao longo dos livros analisados. Desde o tratamento estórico, quanto à ênfase em experimentos descritos exaustivamente por aparatos matemáticos que, futuramente são avaliados na forma de exercícios, tudo é similar. Não existe uma distinção clara entre a apresentação da TR e as demais, desde o espaço ocupado no livro até a utilização de figuras ou curiosidades. Todos os capítulos do livro, no caso do Tipler, apresentam no seu final, “Sugestões para Outras Leituras”, a revisão do capítulo, bem como a lista de problemas. Para a Teoria da Relatividade, nada é diferente.

Podemos perceber portanto que desde a estruturação dos tópicos até às formas de apresentação do conteúdo, os autores levam em conta basicamente as cláusulas do Contrato Didático firmado entre aluno e professor universitários.

IV.3 - LIVROS DO ENSINO MÉDIO

Buscamos agora analisar a forma como os Livros de EM apresentam a TR.

¹⁵⁹ HOLTON (1973), p. 269.

Vários livros de ensino médio foram consultados, no entanto, apenas dois foram analisados efetivamente¹⁶⁰: GONÇALVES¹⁶¹ e ALVARENGA¹⁶². Embora seja um número pequeno frente ao universo disponibilizado no mercado, em especial o segundo já possui uma longa história no ensino da Física, sendo adotado em inúmeras escolas, como por exemplo, o Instituto Estadual de Educação, em Florianópolis.

Esses dois livros, bem como outros consultados¹⁶³, possuem uma estrutura muito similar, sendo constituída basicamente de Unidades, Capítulos, tópicos, exercícios e problemas, e ainda tópicos complementares diversos¹⁶⁴. As unidades, geralmente correspondem às grandes áreas físicas, como a Mecânica, Óptica e Eletromagnetismo, enquanto os capítulos delimitam abrangências menores das unidades.

Os tópicos complementares abrangem as leituras complementares, textos históricos, bibliografias sucintas, curiosidades, experiências, enfim, uma gama de opções que tratam de assuntos não formais. GONÇALVES, por exemplo, opta por apresentar um item chamado de “Texto & Interpretação” como leitura suplementar ao final de cada capítulo.

ALVARENGA traz em seus livros “tópico especial”, com seu subtítulo “para você aprender um pouco mais”. Nesta seção, utiliza uma linguagem simples e um tratamento qualitativo da matéria, com quase nenhum apelo à matemática. Estes textos, ora apresentam aspectos históricos do assunto, ora uma visão mais moderna dos conceitos e leis relacionados ou, ainda, suas aplicações tecnológicas.

Sabemos que esses livros didáticos se destinam a um público específico, os alunos do ensino médio, e por isso levam em consideração os termos do Contrato Didático. A relação aluno/professor deve ser corroborada com a forma de abordagem dos conteúdos, permitindo, por exemplo, a avaliação dos conhecimentos do aluno através de exercícios, problemas e testes.

¹⁶⁰ Dos livros consultados, apenas os dois analisados apresentavam a Teoria da Relatividade Restrita em seu conteúdo. Atualizações dos livros ocorridas no ano de 2000 não estão presentes nessa análise.

¹⁶¹ GONÇALVES (1997)

¹⁶² ALVARENGA (1997)

¹⁶³ Dentre os consultados, podemos destacar SILVA (2000), TOLEDO (1998) E BONJORNO (1993)

¹⁶⁴ Os nomes dados a estas “seções” podem mudar, por exemplo, no lugar de Unidade, se usa Parte para separar os grupos de capítulos. No entanto, a estruturação em si é a mesma.

O fato das seções extras do livro terem uma abordagem claramente diferente do restante do capítulo, assumindo um caráter de curiosidade, leitura complementar, do que efetivamente de conteúdo obrigatório – e por isso constitui um tópico à parte - faz com que essas leituras não sejam obrigatórias, nem tampouco avaliadas pelo professor.

Em geral, a estrutura linearizada e hierárquica presente nestes livros é muito parecida com aquela constatada nos universitários. A diferença existente entre eles, pelo menos em relação aos conteúdos se dá apenas pelo nível de complexidade das teorias e dos formalismos matemáticos empregados. Em se tratando da TRR, no entanto, essa relação de simplificação não é válida, uma vez que esta é apresentada como capítulo nos livros universitários, e como seção complementar nos livros do EM. O tipo de TD nos últimos é, portanto, essencialmente diferente quando comparada com os primeiros.

O que se nota, por exemplo, é que em Alvarenga, os tipos de questões e exercícios são diferenciados se comparados com os realizados no restante do capítulo.

ALVARENGA, por exemplo, insere em seu tópico uma biografia resumida de Einstein, discute alguns exemplos de implicações da Relatividade Restrita¹⁶⁵, como o aumento da massa em função da velocidade do corpo e a conseqüente limitação de velocidade imposta aos corpos materiais.

Inicia a biografia de Einstein, dizendo que:

*O grande físico Albert Einstein, considerado uma das personagens mais importantes do século XX, nasceu em 1879, na cidade de Ulm(...)
Em 1955, no dia 18 de abril, os jornais do mundo inteiro anunciavam a morte de Albert Einstein, reconhecido em seu próprio tempo como uma das maiores inteligências criativas da história da humanidade.*¹⁶⁶

Neste trecho, a autora caracteriza bem a importância e a difusão da imagem de Einstein perante a sociedade e o meio científico.

¹⁶⁵ ALVARENGA (1997), vol. 1, pp. 254/255.

¹⁶⁶ ALVARENGA (1997), p. 256

Faz ainda considerações sobre as limitações da Mecânica Clássica, que concebe o tempo e o espaço como absolutos.

Ao propor um questionário, lança mão de perguntas como:

Um elétron está se movendo, em um acelerador de partículas atômicas, com uma velocidade de $2,7 \times 10^5$ Km/s.

a) Qual a porcentagem da velocidade da luz que esse valor representa?

b) Você acha que as leis de Newton podem ser usadas, com êxito, no estudo do movimento desse elétron?

Esse tipo de questão, apesar de utilizar algoritmos matemáticos, se limita à aplicação direta de fórmula, além de ter uma outra finalidade: a de mostrar um resultado inesperado ou curioso (diferente do clássico). Não existe, portanto, a preocupação estrita com o contrato didático, no tocante às avaliações, embora a lista de exercícios não seja abandonada por completo

GONÇALVES, no tópico “ $E=MC^2$ - A DINÂMICA DAS ALTAS VELOCIDADES” segue um encadeamento lógico para chegar a equivalência entre massa e energia. Inicia seu texto lembrando o aluno a respeito de uma discussão realizada em um tópico anterior sobre massa inercial independente da velocidade. A partir daí, relata que:

“Einstein postulou que nada poderia ter velocidade maior que a velocidade da luz no vácuo (300 000 Km/s). Além disso, sua teoria também prevê que será tanto mais difícil variar a velocidade de um objeto quanto mais próxima do valor da velocidade da luz ela estiver.”

Esse trecho demarca a fronteira entre previsão newtoniana e einsteniana, de forma que o próximo parágrafo do texto, o autor já inicia o relato das modificações previstas pela Relatividade:

Para se ter uma idéia, se a velocidade de um corpo atingir algo em torno de 285 000 Km/s, o valor de sua massa inercial praticamente

triplicará em comparação com o valor da massa inercial do corpo em repouso.

Uma das características marcantes neste trecho, a exemplo de outros, se refere à linguagem utilizada, que sempre denota novidade.

Ao longo de todo o texto, apenas um exemplo de cálculo é apresentado – a relação entre o incremento de energia e o aumento de massa de um corpo, o que mostra a diferença entre este tópico e os não suplementares.

A recontextualização, de uma forma geral é bem diferente daquela realizada nos livros universitários. Não existe a preocupação da operacionalização das Transformações de Lorentz, ou ainda com os experimentos, como o de Michelson-Morley. As versões estóricas, no entanto continuam ocorrendo, pois em nenhum momento o autor justifica as alterações propostas por Einstein, ou ainda, quais os possíveis problemas existentes na física clássica que levaram à sua reformulação.

No livro de Alvarenga, não é justificado a constância da velocidade da luz (um dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita), apenas diz que apesar do resultado parecer estranho, ele é amplamente confirmado em várias verificações experimentais.

Isso evidencia que, embora a Relatividade esteja inserida num tópico complementar, os autores ainda se utilizam do caráter dogmático da abordagem, comumente realizada no restante do livro.

GONÇALVES, ao apresentar o texto “O TRANSCORRER DO TEMPO”, explicita a informatividade, quando não se preocupa em sequer enunciar ou desenvolver os postulados. Em especial, neste texto, o 1º postulado (fundamental), o qual afirma que:

Se K' é um sistema de coordenadas que efetua um movimento uniforme e sem rotação em relação a K , os fenômenos da natureza que se desenrolam em relação a K' obedecem exatamente às mesmas leis que em relação a K .¹⁶⁷

¹⁶⁷ Einstein (1905)

não é nem sequer citado. O autor utiliza as previsões inesperadas dos fenômenos a velocidades altas para enunciar algumas previsões da relatividade restrita como, por exemplo, o aumento de massa e a dilatação do tempo.

Neste mesmo texto, o autor afirma:

Segundo Newton, o tempo é absoluto, isto é, transcorre de modo igual e uniforme em todos os lugares, sem nenhuma relação com qualquer objeto ou observador.(...) Enfim, parece de fato que o tempo corre igual para toda a humanidade e, portanto, para todo o universo. E, de fato essa idéia prevaleceu até que Einstein propôs a teoria da relatividade. Em sua teoria, Einstein afirma que a medida de um certo intervalo de tempo não tem sempre o mesmo valor para qualquer observador...

Pelo tipo de recontextualização apresentada nestes textos, não parece existir uma preocupação com a formação do aluno, mas apenas com a exposição do novo, explorando apenas aquilo que diverge da teoria até então estudada – a Física Clássica. Às vezes o limite do clássico é definido, analogias são realizadas e questões propostas, mas a forma de transposição realizada difere significativamente do restante do livro.

IV.4 - ARTIGOS DE DIVULGAÇÃO

A penetração da TR e da figura de Einstein é tão marcante na sociedade atual, que entender a TD da TR implica em conhecer a forma pela qual ela é influenciada por estes elementos presentes na noosfera. Neste sentido, analisar a forma como as mídias em geral apresentam a TR é muito importante. Optamos por estudar alguns artigos de divulgação em meios eletrônicos.

IV.4.1 – A REVISTA SUPERINTERESSANTE

Dentre os artigos de divulgação científica em circulação, fizemos a análise da Revista Super Interessante pelo fato desta atingir um público amplo e estar no

mercado há bastante tempo, o que leva a crer que suas matérias são bem aceitas pela comunidade.

Optamos basicamente pela consulta ao CD-ROM e à internet¹⁶⁸ no lugar das revistas¹⁶⁹ propriamente ditas pela simplicidade que é promovida no manuseio dos materiais pesquisados. O fato de podermos atribuir palavras-chaves que serão utilizadas para encontrar um ou mais artigos referentes àqueles termos, reduz o tempo gasto na pesquisa de forma expressiva; além de termos a certeza de que nenhuma matéria foi esquecida ou omitida.

Os artigos de divulgação científica apresentam características diferenciadas quando comparadas com os livros de graduação, a começar pela abrangência do público destinado a manusear tal material. Quando, por exemplo, um jornalista científico, ou mesmo um cientista leva à comunidade um determinado conhecimento na forma de artigo não objetiva, com isso, a formação das pessoas que lêem a matéria. Não é pretensão dos divulgadores que os leitores compreendam e consigam manipular de forma coerente e habilidosa os conceitos envolvidos numa teoria como a Relatividade.

Talvez o objetivo maior deste tipo de material seja o de informar o público em geral dos conhecimentos que vêm sendo construídos pela comunidade científica, além de despertar a curiosidade.

Quando iniciamos nossa pesquisa, utilizamos a palavra-chave **relatividade**, e nos deparamos com artigos essencialmente diferentes – pois tratavam de assuntos diferentes - mas que, de uma forma ou de outra faziam alusão à referida teoria.

No artigo “A Última Cartada de Einstein” (SUPER no 12 ano 09), o jornalista Flávio Dieguez levanta apontamentos que não estão presentes nos livros universitários básicos analisados. Ele relata, por exemplo, a postura de rejeição de Einstein diante do rumo que a Física Quântica estava tomando, fazendo com que ele abandonasse este estudo e voltasse suas atenções exclusivamente para a formulação da Teoria da Relatividade.

¹⁶⁸ Utilizamos o site da revista SuperInteressante para atualização dos dados, uma vez que o CD-ROM traz apenas um período da edição desse periódico

¹⁶⁹ Analisamos como material escrito apenas alguns encartes da SUPERINTERESSANTE COLEÇÕES, da série Entenda o seu Mundo, volumes 5 e 11 relativos aos temas Tempo e Universo respectivamente.

Para evidenciar melhor essa observação selecionamos o seguinte trecho deste artigo:

Daí para a frente, os fótons viraram a coqueluche da pesquisa de ponta. Graças a eles, descobriu-se que os elétrons giram em torno dos átomos, um feito extraordinário do dinamarquês Niels Bohr em 1911. Em 1925, o francês Louis de Broglie empregou-os para deduzir fórmulas mais precisas das ondas de matéria. Einstein, porém, não aceitava os rumos que sua própria invenção estava tomando nas mãos de outros pesquisadores. E se dedicou integralmente a aprimorar sua teoria da relatividade.

A descoberta do quinto estado da matéria não foi exatamente um motivo de alegria para Albert Einstein...

A recontextualização feita nesse artigo é diferente da realizada nos livros universitários. Talvez por objetivar a informação dos saberes produzidos no âmbito da comunidade científica, leva a público, muitas das vezes, uma série de fatos, e lança mão destes para contextualizar o eixo central da discussão. Assim, não entra no mérito, no detalhamento de cada teoria específica.

Em uma mesma página, por exemplo, a SuperInteressante expõe um texto que relata algumas diferenças entre as concepções newtonianas e einstenianas sobre o tempo e o espaço. Abaixo deste, um boxe descreve o paradoxo dos gêmeos. Ao lado dessas duas apresentações encontramos três destaques, sendo um deles sobre a estagnação do tempo no buraco negro, um outro mostra a origem etimológica da palavra calendário e, por último uma ilustração referente às deformações no tempo decorrentes da força gravitacional. Qualquer uma das partes pode ser lida primeiro ou por último, tendo em vista que não existe uma dependência entre elas com relação ao entendimento das informações.

Essa teia de conhecimentos que é feita durante a recontextualização, bem como a ausência de uma estrutura linear na apresentação dos conteúdos - apesar de existirem tópicos, não existe uma hierarquia entre eles, mesmo porque, tratam de aspectos diferentes do mesmo assunto - denotam uma diferença importante entre livro e artigo de divulgação.

Em uma de suas primeiras edições, a revista SuperInteressante publicou uma reportagem sobre Einstein (SUPER no 2 ano 01), relatando alguns aspectos e fatos de sua vida. Em anexo a essa reportagem uma caixa de texto intitulada “As idéias que demoliram a velha ciência” trata da Teoria da Relatividade proposta por Einstein, bem como algumas conseqüências fundamentais na física estabelecida até então, provocadas pela nova concepção de mundo desse cientista.

Ao iniciar esta caixa de texto, faz alusão à época em que o eletromagnetismo, calcado no éter, se confrontava com as previsões newtonianas de alguns experimentos. As incompatibilidades existentes no século XIX que serviram de motivação para Einstein postular a sua revolucionária teoria:

Em 1887, descobriu-se que um sinal luminoso viaja sempre à mesma velocidade no espaço vazio. A partir dessa descoberta, Einstein iria demolir o edifício da Física clássica. Ele percebeu que a constância da velocidade da luz punha em xeque o conceito tradicional de simultaneidade.

Neste trecho, a despersonalização evidente do saber – descobriu-se – é contraposta logo em seguida pela identificação de Einstein como provedor de mudança na ciência.

Ao dizer que:

*No início do século, o tempo era absoluto e passava de maneira igual tanto para você, aqui na Terra, quanto para um eventual extraterrestre, numa galáxia distante. Era assim que a Física pensava, de acordo com os princípios formulados pelo inglês Isaac Newton...*¹⁷⁰

o autor trata a concepção newtoniana como sendo própria da comunidade científica da época. O conhecimento, na verdade assume o estatus de “saber”, como sendo algo acima das particularidades de seu criador. Este saber é tido

¹⁷⁰ Vomero, Maria Fernanda, “Que horas são na sua espaçonave”, In. SUPERINTERESSANTE COLEÇÕES “O TEMPO”, VOL. 5, pp. 8

como impessoal, sem qualquer vínculo com interesses pessoais de Isaac Newton, pois foi apropriado pela comunidade científica e, de certa forma, fica acima das vontades humanas. Esse tipo de tratamento dado a uma teoria ou conhecimento faz com que o leitor não questione a sua veracidade, pois seu patamar se encontra além das falhas possíveis do ser humano.

No parágrafo seguinte ao trecho supracitado, o autor diz que em 1905, a concepção newtoniana veio abaixo, em detrimento da exposição da Relatividade einsteniana.

As referências feitas a Einstein como sendo um “notável” cientista, às vezes tido como um “visionário” capaz de perceber o que a natureza mostrava em suas evidências experimentais, são responsáveis pelo ícone Einstein. Esse tipo de tratamento é coerente com a visão empirista da ciência, característica muito presente nos artigos de divulgação de um modo geral.

O empirismo de Francis Bacon é a concepção mais tradicional sobre a natureza do conhecimento científico, caracterizado pela crença de que o conhecimento origina-se na observação, e pela indução, por dirigir-se dos fatos às teorias, do particular ao geral. Criticando a prática das pessoas argumentarem sobre Aristóteles sem observar a natureza, ele recomendava limpar a mente, viciada de preconceitos individuais e coletivos, e realizar investigações cooperativas na comunidade científica.

Einstein seria, portanto, segundo os artigos de divulgação científica, um ótimo cientista, pois seguiu à risca o método científico propalado por Bacon. Bacon enfatizava a verdade como descoberta. É essa filosofia implícita ou explícita nos textos de divulgação, a responsável pela mitificação do ícone Einstein, tornando a física algo alcançável e inteligível apenas para os gênios.

Segundo ZANETIC (1989):

“É preciso recolocar o método indutivo nos seus limites e contextos apropriados. A concepção comumente propalada e até mesmo verossímil de que a observação e a experimentação, realizadas com o intuito de coletar e organizar dados do real, permitem a elaboração de hipóteses de trabalho que, após o confronto verificador com novas

observações e experiências, levaria a um conhecimento verdadeiro ou às leis da natureza, precisa ser criticamente debatida.” (pág. 62)

Diante do tratamento dado ao saber produzido pela comunidade científica, no intuito de ser passado para o público em geral, podemos afirmar que existe uma transposição didática, mas sem conotação escolar. Nessa perspectiva, a transposição realizada nos artigos de divulgação não é didática no seu sentido estrito, pois não se destina à aplicação direta no ambiente escolar, embora saibamos da possibilidade de utilização desse material em sala. Não existe a preocupação dos artigos de divulgação em atender a relação professor-aluno e todas as suas aplicações, isto é, esse tipo de material não prevê atividades inerentes ao ambiente didático, como avaliações.

No entanto, defendemos a idéia que a transposição existe, na medida em que os artigos não se destinam à comunidade científica, e portanto devem sofrer transformações para que possam ser inteligíveis ao público leigo.

Uma outra consideração a se fazer é que a Transposição Didática prevê a reformulação dos conteúdos a serem introduzidos no sistema didático, no entanto, mostra que esse processo não é instantâneo. Uma vez sentida a necessidade de atualização curricular, seja por envelhecimento biológico ou moral, o saber sábio escolhido para se tornar um saber a ensinar que futuramente será um saber ensinado, deve ser submetido a uma série de transformações. Isso leva um tempo relativamente maior do que o gasto para se divulgar as novas descobertas e feitos científicos.

Essa diferença temporal existente entre a transposição ocorrida nos livros e nas revistas de divulgação se deve justamente à adequação que o saber deve sofrer para atender as normas do sistema didático. O rigor matemático, a estruturação, a seqüência didática, a recontextualização, os vínculos que este conteúdo deve estabelecer com os outros presentes no mesmo capítulo ou livro, enfim, tudo deve ser pensado para que o encaixe deste novo saber na forma do livro didático se dê.

Uma variável também importante neste processo, e que vai além do simples formato de apresentação, é o tempo didático. Para que este novo saber possa ser operacionalizado no sistema didático, deve-se promover uma reorganização do

tempo dedicado para cada conteúdo presente na grade curricular. Não se pode simplesmente “inflar” o ano letivo em função da inserção de um novo tópico no currículo. Assim, conteúdos deverão ser reduzidos, outros porventura até retirados.

O foco das preocupações da revista de divulgação durante a edição é distinto do livro didático, sim, embora as transformações do saber sábio também ocorram.

Quanto às revistas de divulgação, estas desempenham dois papéis distintos ao longo da Transposição da Teoria da Relatividade. Num primeiro momento os artigos de divulgação, quando presentes em grande número no meio social, fazem com que a noosfera pressione a transposição deste conteúdo por uma questão de atualização curricular. A necessidade de reformulação do quadro de conteúdos a serem tratados no Ensino Médio é gerada em função da “obsolescência” dos conteúdos tratados em sala, já que um dos papéis da escola é levar até o aluno conhecimentos novos, capazes de promover uma harmonização entre o que ocorre no meio social e no sistema de ensino. Chevallard afirma que:

*... não se compreende o que ocorre no interior do sistema didático se não levar em conta seu exterior. O sistema didático é um sistema aberto. Sua sobrevivência supõe sua compatibilização com o seu meio. Ele deve responder às exigências que acompanham e justificam o projeto social a cuja atualização deve responder.*¹⁷¹

Num segundo momento, veremos que pelo fato deste conteúdo de Física Moderna ser recente nos parâmetros curriculares, ainda não existe uma transposição didática bem estabelecida, que esteja adequada ao funcionamento de ensino. As transformações sofridas por este conteúdo específico, e acreditamos ser aplicável também a outros conteúdos de Física Moderna, ainda são diferentes quando comparadas com os demais conteúdos curriculares. Isto promove uma semelhança entre o tipo de transposição ocorrida nos artigos de divulgação e nos livros didáticos do Ensino Médio.

¹⁷¹ CHEVALLARD (1991), p. 17

IV.4.2 - ENCICLOPÉDIA BARSA CD E ENCARTA 2001

Optamos pela análise também das enciclopédias BARSA CD e ENCARTA 2001, por serem fontes de pesquisa e de consulta por parte daqueles que não têm acesso às revistas de divulgação e/ou preferem consultar fontes que possuam uma certa respeitabilidade quanto às informações disponibilizadas. Existiu uma época – não muito tempo atrás – em que a enciclopédia era o único meio de obtenção de informações extras, isto é, que não estavam presentes nos livros escolares. É certo que hoje em dia o panorama se modificou, e com ele a forma de apresentação das enciclopédias. Embora ainda existam em formato encadernado, mesmo as mais tradicionais, como a Barsa e a Britânica lançaram CD's no mercado.

O manuseio facilitado e os recursos disponíveis, como o vídeo que não é explorado nos livros e pouco utilizado no outro CD-ROM analisado, também denotam um diferencial que justifica a opção por esta fonte de pesquisa.

A estrutura geral dessas enciclopédias é muito parecida, possuindo basicamente um texto central, a partir do qual outras informações são acessadas em formatos diferentes. Estas ramificações podem unir o texto central a um ou mais artigos secundários ou ainda a mídias como vídeo e imagens. Existe uma diferença peculiar entre a Barsa e a Encarta referente a opção de pesquisa na internet que não existe na primeira, mas é oferecida pela segunda.

O material disponibilizado pela Encarta especificamente se resume basicamente a um texto central, a partir do qual outros são acessados, três mídias e a busca na internet.

O texto central constitui a espinha dorsal da apresentação. Nele são fornecidas informações completamente destituídas de história e ou justificção ocorridas durante a formulação da Teoria da Relatividade. Nem citações originais ou frases são apresentadas ao longo do texto. A forma impessoal da apresentação, talvez seja o ponto mais marcante. Embora o texto dê os créditos da Teoria da Relatividade ao seu criador, Albert Einstein, este último não parece ter tido nenhuma dificuldade em formular as teorias. No início do texto, a despersonalização fica clara:

*Relatividade, teoria desenvolvida no início do século XX, que, originalmente, pretendia explicar certas anomalias no conceito do movimento relativo, mas, em sua evolução, converteu-se em uma das teorias básicas mais importantes das ciências físicas. Desenvolvida fundamentalmente por Albert Einstein, foi a base para que os físicos demonstrassem, posteriormente, a unidade essencial da matéria e da energia, do espaço e do tempo, e a equivalência entre as forças de gravitação e os efeitos da aceleração de um sistema.*¹⁷²

O tempo verbal e a forma descritiva da teoria demonstram a impessoalidade dada ao texto. O caráter dogmático do texto se alia à falta de problemas enfrentados por Einstein ou qualquer outro pesquisador que tenha tentado o mesmo feito. A construção de uma teoria acaba reduzida à observação e dedução. No trecho abaixo, notamos que, embora seja Einstein o autor do artigo, a ênfase maior é dada ao artigo em si, de forma que se fosse outro cientista qualquer o propositor da Teoria da Relatividade, a explicação se daria da mesma forma, a não ser pelo nome do autor.

Em 1905, Einstein publicou seu artigo sobre a teoria da relatividade especial segundo o qual nenhum objeto do Universo se distingue por proporcionar um marco de referência absoluto em repouso(...) Também deduz que o comprimento, a massa e o tempo de um objeto variam com sua velocidade.

Essas características apontadas para a enciclopédia Encarta também se enquadram para a Barsa. Na seleção abaixo, por exemplo, podemos perceber o caráter descritivo e impessoal tanto da teoria, quanto de suas implicações, não entrando no mérito das explicações de cada uma em nenhum momento:

¹⁷²"Relatividade." *Enciclopédia® Microsoft® Encarta 2001*. © 1993-2000 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

Essas hipóteses, apoiadas pelas experiências de Michelson-Morley sobre a velocidade da luz, negaram a existência do éter cósmico e revelaram um princípio que se tornou fundamental na ciência do século XX: a velocidade da luz é inatingível por qualquer partícula material, e além disso é insuperável.

As conseqüências diretas da teoria restrita, apoiadas em rigorosa formulação matemática, revolucionaram os postulados da ciência. De maneira geral, um objeto material com velocidade próxima à da luz sofre efeitos surpreendentes: sua massa aumenta, o espaço se contrai e o tempo se dilata. Estes dois últimos efeitos se deduzem das equações de Lorentz.

Apesar de citar que a massa aumenta, o espaço se contrai e o tempo se dilata, o texto não se preocupa em descrever o porquê dessas conseqüências. Não é óbvia a conexão entre os postulados da TRR e as conseqüências apontadas. Isso mostra claramente a despreocupação com o convencimento característico do livro didático.

Em relação à Teoria da Relatividade Geral, o formato do texto utilizado segue as mesmas características da TRR. No trecho abaixo, vemos que a linguagem utilizada quando as implicações da Teoria da Relatividade Geral na física são tratadas é muito parecida com a forma descritiva e impessoal do trecho supracitado:

Entre os principais resultados que apoiaram as hipóteses relativistas se incluem: a explicação das anomalias observadas desde o século XIX nas órbitas do planeta Mercúrio, mediante a inclusão do conceito de campo gravitacional relativista, no qual a trajetória da luz se curva na presença de fortes campos gravitacionais; a interpretação dos fenômenos das partículas atômicas lançadas em alta velocidade no interior de aceleradores como ciclotrons e similares; e a construção de teorias cosmológicas da estrutura de sistemas galácticos e estelares e da forma e origem do universo.

Assim como nos artigos de divulgação, o tratamento matemático dado também é incipiente, o que caracteriza uma despreocupação em relação a possíveis avaliações posteriores. A única equação que aparece ao longo de todo o texto das duas enciclopédias é a $E = mc^2$, mas apenas com o caráter ilustrativo da relação massa e energia. Quanto aos termos científicos específicos, como massa, energia e simultaneidade, apenas a Encarta possui links estabelecidos para explicações mais detalhadas.

Podemos acrescentar ainda, que a forma de encadeamento entre os tópicos ou verbetes não se dá em forma seqüencial. Assim como na Revista SuperInteressante, a estrutura de hyper-texto promove uma tridimensionalidade da apresentação. No entanto, apesar da estruturação ser diferente se comparada com a dos livros didáticos, onde o encadeamento deve se dar através de tópicos e sub-tópicos, não existe uma propriedade específica que não permita a transformação de um no outro. Isto é, os links presentes no CD-ROM podem ser perfeitamente encadeados na forma de tópicos e sub-tópicos sem que haja conseqüências maiores no entendimento do texto, da mesma forma que os itens dos livros poderiam ser montados em hyper-texto por meio de links. A enciclopédia Barsa CD, por exemplo traz o “perfil” do verbete apresentado, no caso a Teoria da Relatividade, em forma de tópicos e sub-tópicos, numa hierarquia linear.

O fato de linearizar os links implica em estabelecer não apenas uma ordem, mas também uma hierarquia entre os tópicos, que está presente nos textos. Essa tarefa não é tão árdua, uma vez que o texto central ocupa lugar de destaque dentro da rede e os tópicos “linkados” se encontram subordinados a este. Quanto às definições de termos específicos, estes podem formar um glossário ao final do capítulo – montagem inclusive muito usual dos livros.

Talvez uma impossibilidade de conversão de um método para outro resida na apresentação de mídias. Dos três vídeos presentes na enciclopédia ENCARTA, um aborda o experimento de Michelson-Morley, e os outros dois as Teorias da Relatividade Restrita e Geral. O conteúdo do primeiro se resume basicamente na explicação da montagem, do resultado esperado e obtido do experimento, enquanto os outros dois tratam sobre as conseqüências previstas e/ou detectadas pela teoria.

Uma outra impossibilidade se deve ao fato dessa enciclopédia em específico disponibilizar a pesquisa na internet. Ao especificar o verbete procurado, caso o computador esteja conectado à internet, a enciclopédia utiliza um navegador próprio que busca sites na rede que tratem daquele assunto. Ao compararmos a quantidade de informação disponibilizada no CD-ROM e na internet, percebemos que a primeira é significativamente menor do que na segunda. Isso nos leva a crer que o intuito da enciclopédia seja a de fornecer uma visão muito mais introdutória do assunto, do que propriamente definitiva e abrangente¹⁷³.

IV.5 – O PERFIL DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DA TEORIA DA RELATIVIDADE NOS LIVROS DO ENSINO MÉDIO

Vimos que os livros universitários ocupam um lugar mais próximo da produção de saberes do que os livros didáticos do Ensino Médio, e na maioria das vezes são usados como referencial na confecção destes últimos. Mostramos ainda que, em geral, os livros didáticos utilizados no Ensino Médio são meras simplificações dos universitários, de forma que o aparato matemático rebuscado e criterioso dá lugar a equações e funções estudadas mais simples.

No entanto, o que ocorre com a TD da TRR é que, por ser um conteúdo novo, o processo de transposição ainda não está sedimentado ao ponto de fazer parte dos capítulos e tópicos. Ela começa adentrar o panorama didático através dos apêndices e leituras suplementares. Neste estágio, a recontextualização é tal que é dada preferência ao caráter informativo, de curiosidade, no lugar do formativo característico do restante das seções. Em relação ao formalismo matemático, este se encontra quase incipiente, por opção de um tratamento mais qualitativo. O caráter experimental, resultado da importância atribuída a estas práticas durante a formulação das teorias, ocorre agora num outro nível: apenas de corroboração com os resultados previstos pela teoria, se limitando às vezes, a uma mera ilustração. Esta forma de transpor os conteúdos, se aproxima muitas das vezes, da realizada nos artigos de divulgação. Podemos perceber uma certa semelhança entre os livros secundários e os artigos, quanto ao seu caráter **informativo** e não **formativo**. A atenção dada a

¹⁷³ A pesquisa na internet com o termo Teoria da Relatividade resultou em mais de 150 sites sobre o assunto

curiosidades, notas bibliográficas e cálculos apenas para ilustrar fatos novos, imprevistos por outras teorias fazem parte dos dois contextos, tanto da revista quanto do apêndice.

O vínculo entre a TRR dos livros didáticos e a do artigo de divulgação extrapola os processos de modificação do saber, uma vez que se configura também nas pressões da noosfera no processo de reavaliação da Transposição Didática vigente. A quantidade imensa de informações sendo veiculadas pela mídia em geral, contribuiu para que a sociedade aumentasse a pressão pela inserção da Física Moderna no Ensino Médio. O ícone Einstein presente em diversas formas de divulgação científica colocava, de certa forma, em xeque o papel da escola sobre a formação em Física. A bandeira das Teorias da Relatividade empunhada pelo ícone do gênio Einstein, forçava uma atualização curricular. A escola não podia mais desprezar as concepções geradas pela mídia sobre a FMC.

Diante dessa pressão exercida pela noosfera, os parâmetros curriculares do Ensino Médio inseriram a FMC no cenário escolar. Concomitantemente, os autores de livros didáticos passaram a inserir a TRR em seus tópicos suplementares. A TRR ocupa hoje, um período que “incubação”. O lugar das leituras suplementares pode se tornar um eterno chocador ou propiciar a introdução da TRR na forma de capítulos dos livros do EM.

O status de curiosidade, de novidade, embora seja remoto, dará à TRR apenas um lugar destacado na história da Física que hoje é tratada em quadrinhos no canto da página. Poderá ainda continuar sendo tratada como uma extrapolação da Mecânica aplicada a fenômenos de alta velocidade. Talvez isso seja satisfatório para o aluno e para a noosfera enquanto modificadores do currículo e do ensino escolar.

A opção de tratar essa teoria em um capítulo ou ao longo dos capítulos também existe e deve ser preferencial. Reside em nossas mãos (noosfera) o destino desta teoria revolucionária, mesmo que esta se transforme em um capítulo.

A TD que será realizada para que a TRR deixe de ocupar a leitura complementar, e passe a ser tratada formalmente, pode se dar de duas formas

distintas: por acomodação ou por assimilação, em analogia aos processos piagetianos.

Se essa transição for por assimilação, então a TRR reforçará o processo de simplificação dos livros universitários. Não ocorrerá uma ruptura com a TD vigente, de forma que a experiência de Michelson-Morley constituirá novamente papel crucial na abordagem desta teoria e as Transformações de Lorentz comporão o formulário das avaliações aplicadas pelos professores. Teremos portanto, um capítulo de mecânica relativística sem relatividade, ou melhor, uma cinemática das altas velocidades.

No entanto, caso exista um investimento em pesquisa aplicada no sentido de reformular o quadro vigente atual, teremos a acomodação de uma nova TD, diferenciada, capaz de contagiar a estrutura do Sistema Didático, e ainda o tratamento dos outros conteúdos da Física. A Relatividade possui elementos suficientes para revolucionar o sistema de ensino atual.

Se buscamos a mudança de postura do aluno diante do mundo que o cerca, através de um processo cultural científico, eis uma possibilidade vigente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

INTRODUÇÃO

O ensino da Física passa atualmente por um momento de reavaliação da TD existente. Os objetivos que a educação científica se propõe atingir, hoje, não podem ser alcançados, tendo em vista a forma com que os conteúdos de Física e áreas têm sido tratados no Sistema Didático.

Conteúdos, como é o caso da Relatividade, têm sido propostos para a reformulação do currículo escolar há mais de duas décadas, mas esse processo não se dá de imediato. A noosfera é constituída de elementos distintos, que por sua vez exercem pressão em diferentes níveis dos processos de TD, de forma que, o processo como um todo, se torna lento.

A TR ocupa hoje um espaço de transição entre o novo (apêndice) e o estável (capítulo de livro) dentro do Ensino Médio. A nível universitário, esse processo já está mais avançado. Percebe-se um número crescente dos livros universitários que hoje trazem a TR dentro de sua estrutura principal de conteúdos. À medida que isso vêm se processando, a TR têm assumido um caráter similar ao restante dos conteúdos já estáveis nos livros, isto é, neste material ocorre uma assimilação. TIPLER operou algumas modificações na apresentação da TR em sua última edição: retirou o texto histórico redigido por Gerald Holton. Essa exclusão denota a assimilação do tratamento estórico-experimental presente nas teorias já sedimentadas.

Esse fato nos serve de alerta se quisermos modificar realmente a abordagem aplicada ao EM. A TR possui elementos suficientes para que tomemos qualquer um dos dois caminhos possíveis, isto é, disponibiliza ferramentas matemáticas e experimentos suficientes para uma abordagem estórico-experimental, assim como, possibilita uma reflexão sobre conceitos fundamentais da Física se tratada nos moldes filosófico-cognitivos.

Os pesquisadores na área de ensino possuem um posicionamento geral bem claro diante da perspectiva do EM, buscando a formação de um indivíduo autônomo, capaz de interpretar e atuar no mundo que o cerca. Esta também é a nossa bandeira.

Como integrantes da noosfera, nos cabe uma atitude frente a esta situação, no sentido de agilizar um processo viável de TD. Dentro das propostas de inserção da TRR analisadas, optamos por apresentar a de Angotti et all, por estar sedimentada numa perspectiva construtivista. Esta abordagem corresponde às expectativas atuais, além de despertar no aluno, entre muitos aspectos positivos, a motivação. A separação entre objetivos de conteúdo e de atitude fornece a este curso um enfoque conceitual, onde o conteúdo é fundamental e todo o esforço dos propositores é fazer com que certos conceitos primordiais estejam entrelaçados e esclarecidos. Isto implica no estabelecimento de uma rede de conceitos estável o suficiente para servir de início para um aprofundamento matemático e para operações mais sofisticadas, dentre as quais, as modificações das atitudes dos alunos.

A PROPOSTA DE ANGOTTI ET ALL

Como salientamos anteriormente, a proposta de Angotti et all privilegia os objetivos de atitudes em relação aos objetivos de conteúdo. Espera-se que esses objetivos levem a uma maior assimilação das idéias apresentadas em contraposição à simples memorização de resultados e conclusões previamente estabelecidas. Para tanto, não se pode apenas utilizar um texto de relatividade diferenciado, e sim, uma abordagem e metodologia diferenciada.

O método de ensino adotado tem como núcleo a discussão, no lugar da apresentação de informações aos alunos. Aliar a teoria com a realidade do estudante era um grande problema a ser superado, de forma que foi decidida a utilização de dois vídeos sobre relatividade, os quais foram julgados como adequados ao programa.

Um ciclo iniciado pelo concreto, se estendendo para o abstrato e retornando novamente ao concreto serviu de espinha dorsal para as atividades do módulo. Inspirados pela idéia de Haber-Schaim¹⁷⁴, foi decidido iniciar o módulo partindo pela dinâmica, indo para considerações abstratas da cinemática relativística, e mais tarde relacionando com a dinâmica novamente, bem como as suas

¹⁷⁴ Phys. Teac. 9, 75 (1971)

aplicações. Por outro lado, pretendia-se enfatizar os conceitos fundamentais e isso levou à inclusão de profundas discussões em torno de paradoxos aparentes em detrimento de uma ênfase maior no formalismo matemático da teoria e aplicações de fórmulas. Por isso, as Transformações de Lorentz foram concebidas como uma unidade opcional do programa.

As unidades do módulo são (com a estimativa do número de horas/aulas especificada em parênteses): (i) dinâmica relativística (4); (ii) medida de tempo e espaço (3); (iii) simultaneidade (3); (iv) Transformações de Lorentz (opcional) (4), (v) Revisão histórica e síntese (3).

Cada uma dessas unidades será apresentada a seguir:

UNIDADE 1: Dinâmica Relativística

1 – Apresentação do filme “The Ultimate Speed”. A participação do professor deve se restringir a uma breve introdução ao filme e atuar como coordenador nas discussões em grupo que seguem.

O filme mostra elétrons aumentando suas velocidades num acelerador linear sem, no entanto, alcançarem as velocidades previstas pelo cálculo clássico. Um gráfico de v^2 versus energia recebida do campo eletrostático é apresentado. Ao final do filme, é mostrada uma experiência que serve de evidência experimental de que os elétrons continuam recebendo a energia em questão.

Com esse pano de fundo, o restante das 2 h/a são destinadas à discussão. Num estudo dirigido, é fornecida uma tabela de dados retirada do filme e alguns temas de discussão são sugeridos: a) O que um cientista faz quando se depara com uma discrepância fundamental entre a previsão teórica e a evidência experimental ?; b) Tente formular hipóteses que explique o experimento.

2 – Na aula seguinte, os estudantes são encorajados a determinar possíveis expressões que se ajustam ao gráfico.

3 – Com a expressão para a energia cinética T , que é razoavelmente justificada com base na evidência experimental, a unidade se direciona para a introdução do conceito de *momento relativístico* p . Com a expressão de p estabelecida, já se tem todas as dificuldades matemáticas de pano de fundo e mais ou menos todo o restante do curso pode ser destinado às discussões das

mudanças dos conceitos fundamentais que essas novas fórmulas (e o segundo filme) implicam.

4 – Enquanto a parte anterior não leva o aluno à participação efetiva, nesta última parte da unidade, primeiramente se introduz o conceito de massa relativística, enfatizando, no entanto, que essa é apenas uma possibilidade de interpretação do fator $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ na fórmula para o momento relativístico.

A introdução da massa relativística para a energia cinética fornece a plausibilidade para argumentar no sentido da relação Einsteniana de massa e energia. Essa relação leva a uma discussão de aplicações tecnológicas e suas implicações sociais.

UNIDADE 2: Medida de Espaço e Tempo

1 – Da mesma forma que a primeira unidade, a introdução desta é feita à partir de um filme, neste caso, “Time Dilation – Na Experiment with μ -Mésons”, o qual fornece uma excelente discussão iniciada depois de uma explanação teórica no começo e parada no ponto em que é recordado o resultado surpreendente de que 412 mésons são registrados ao nível do mar em comparação com o número esperado de 27. Os alunos são questionados explicitamente a discutir as seguintes hipóteses: Hipótese 1: O decaimento dos mésons é independente da velocidade. Hipótese 2: O tempo de viagem do méson é encontrada através da razão entre a distância percorrida pelo méson e a sua velocidade. Hipótese 3: O tempo de viagem medido pelo méson (pelo seu decaimento) é idêntico ao tempo medido pelos observadores na Terra.

As discussões devem levar a questões relevantes, como: Qual velocidade? Relativa a o quê? Qual distância? Em que sistema de referência?

2 – Na próxima parte da unidade, o aluno é convidado a discutir sobre um diálogo fictício entre um observador na Terra e um observador que se move junto com os mésons. A idéia é criar dificuldades que possibilitem o aluno a relacionar as dificuldades encontradas no primeiro filme e as modificações subseqüentes introduzidas na dinâmica com as dificuldades encontradas no segundo filme e as implicações para a cinemática com o possível abandono da hipótese 3.

3 – Esta relação entre os aspectos dinâmicos e cinemáticos do problema é reforçada na última parte da unidade. Chega-se à conclusão que o fator $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ na fórmula do momento, o qual havia sido interpretado como pertencente à massa, pode ser reinterpretado como pertencendo ao tempo, formando então uma relação entre as duas unidades. É dado um exercício que introduz o famoso paradoxo da barra e do buraco¹⁷⁵.

UNIDADE 3: Simultaneidade

1 – Essa unidade se inicia através do questionamento se a contração do espaço e a dilatação do tempo são reais. A discussão girará em torno da noção de realidade dos conceitos físicos. Depois das discussões entre os estudantes, a aula posterior retoma essa questão através de um exemplo fornecido por uma variação do paradoxo do buraco mencionado acima. Através desse exercício, duas noções importantes são introduzidas: a noção de evento, e a noção de simultaneidade.

2 – Neste momento é sublinhada a reciprocidade dos efeitos da contração do espaço e da dilatação do tempo tanto quanto a simetria entre os observadores.

3 – Pede-se aos alunos que redijam suas próprias idéias sobre a forma pela qual um astronauta numa espaçonave, movendo-se com velocidade constante relativa a Terra, pode comparar suas medidas de tempo com as da Terra. Posteriormente, os alunos são chamados a discutir suas idéias. No entanto, antes de prosseguir o desenvolvimento das argumentações, os estudantes são requisitados a analisar e discutir uma situação análoga onde um observador situado num barco deve determinar se um evento ocorrido na embarcação se deu antes ou depois da emissão de um sinal sonoro oriundo da margem.

Neste instante é introduzido o limite de velocidade como sendo aquela máxima de um sinal e discutido o análogo do exemplo anterior, para a luz. Depois de mais uma discussão os estudantes finalmente respondem a questões e exercícios relativos a problemas de sincronização e a relatividade da simultaneidade.

¹⁷⁵ MARTINS (1978)

UNIDADE 4: A Transformação de Lorentz

1 – A Transformação de Lorentz é introduzida como sendo derivada diretamente dos efeitos da dilatação do tempo e da contração do tempo. O método é adaptado de um livro-texto¹⁷⁶.

2 e 3 – A segunda parte dessa unidade introduz ao estudante a noção de quadri-vetor e na última parte eles são levados a conceber o campo magnético como um efeito relativístico.

UNIDADE 5: Revisão Histórica e Síntese

1 – Na revisão histórica dada nessa unidade, tenta-se chegar ao coração da realização de Einstein através de sua ligação com as três hipóteses introduzidas na unidade 2. Depois de analisado o problema da velocidade da luz, é mostrado como a definição circular: espaço-velocidade-tempo (hipótese 2) era quebrada numa colocação inesperada de Einstein, e percebendo o grau de liberdade (entre essas grandezas), o que permite abandonar a terceira hipótese. Chega-se então na concepção de tempo como uma quantidade derivada e que varia de um sistema de referencia inercial para outro. Isso leva ao estabelecimento dos dois postulados da Relatividade Especial.

2 – Nessa última parte do curso, retorna-se novamente às discussões, as quais são divididas em dois grupos: de conteúdo onde as conclusões são importantes, e as gerais onde a discussão em si é o objetivo principal. Neste último grupo, finalmente retorna-se aos aspectos sociais, os quais são introduzidos novamente através de tópicos como: algumas formas pelas quais a TR tem influenciado a história do ser humano.

ALGUNS APONTAMENTOS

¹⁷⁶ E. S. Johansen, Mekanisk Fysik I (Gjellerup, Copenhagen, 1950)

Podemos dizer que existe uma seqüência nas atividades propostas aos alunos ao longo do módulo de ensino, que é voltado para o público universitário. A espinha dorsal do trabalho consiste, basicamente, em o professor apresentar um problema através de algum recurso instrucional (vídeo, texto, estória, etc), o qual deve ser discutido primeiramente em pequenos grupos, e a posteriori com o restante da turma. Em alguns momentos, se faz necessário que o professor não se limite a conduzir apenas a discussão, mas também esclareça alguns pontos específicos, ou ainda exponha determinados conteúdos.

O tempo destinado à discussão histórica e social nessa proposta é pequeno se comparado com o total, o que é perfeitamente compreensível em se tratando de um curso voltado para futuros cientistas. Estes alunos identificam nas incompatibilidades existentes entre previsão teórica e resultados experimentais, um problema a ser resolvido. Isto é, os problemas conceituais e/ou experimentais por terem um significado próprio à prática científica, servem para eles como uma razão/motivação para uma discussão mais profunda sobre o tema. Aliás, um dos pontos fortes deste módulo de ensino sobre Relatividade, aponta os autores, é a motivação.

Nessa conjuntura, caso a contextualização histórica fosse utilizada na apresentação dos problemas, por exemplo, esta serviria apenas de pano de fundo para a discussão, já que o cerne do problema residiria ainda no conflito entre teoria e prática. Talvez seja este o motivo pelo qual os autores optaram pela utilização da história e dos aspectos sociais basicamente durante o encerramento: o fato de este momento ser propício para uma reflexão sobre as origens e implicações da teoria estudada.

Angotti et all aponta algumas conclusões a respeito do seu trabalho, dentre as quais destacamos o conflito entre a dinâmica utilizada e a postura do professor. Explicitando melhor, existe uma contradição entre as discussões abertas e o fato de, em todas as discussões, com exceção das do tipo sociais, pensarmos que sabemos as respostas e, em alguns estágios, temos que concordar com isso para avançar.

A forma pela qual o trabalho é conduzido leva ainda a um outro conflito, dessa vez entre o tempo que se dispende e a quantidade de conteúdos que devem ser ensinados. Com certeza o privilégio pelos objetivos atitudes fez com

que existisse uma redução dos conteúdos ministrados, e esse é o preço a ser pago pela escolha.

Este curso foi re-testado pelos professores R. Rovigatii, W. Gennari e A. Villani, que não tinham participado da sua elaboração inicial, com a finalidade de levantar as possibilidades de aprofundamento e aperfeiçoamento. VILLANI¹⁷⁷ chegou a discutir e avaliar essa experiência, apontando comentários, sugestões e algumas perspectivas de continuidade do trabalho.

Os resultados expostos por Villani podem ser resumidos brevemente em algumas considerações. Em primeiro lugar, houve um salto significativo na clareza e nas hipóteses propostas para explicação de problemas apresentados aos alunos. Eles elaboraram dois resumos ao longo de cada um dos três primeiros dias de trabalho, o primeiro logo após a apresentação do problema¹⁷⁸ e outro após as discussões em grupo. Essa diferença notada ao nível das idéias se refletiu na avaliação final, onde problemas conceituais foram solucionados com aproximadamente 70% das respostas corretas.

Em relação às conclusões, salienta que:

...trata-se de um curso suficientemente adequado a alunos que terminaram o primeiro ano de física e que pode ser melhorado com um tratamento adequado da apresentação dos problemas através dos filmes...

...a escolha de pontos chaves foi boa, pois uma vez garantidos, a utilização do formalismo matemático torna-se realmente trivial...

... podemos dizer que a escolha das atividades e da seqüência é particularmente interessante: nos impressionou a consistência das discussões entre os alunos e o progresso havido entre a primeira discussão sobre a “Velocidade Limite” e a última sobre a “Pressão da Luz”...

... a imagem da ciência que aparece é bem tradicional apesar de convidar para ulteriores leituras e discussões abertas. Na nossa

¹⁷⁷ VILLANI (1980)

¹⁷⁸ Nos três primeiros dias, problemas foram expostos através de um filme ou texto para serem resolvidos

opinião não existem pontos concretos de análise do significado da revolução einsteniana do ponto de vista científico e cultural.

Embora sugira algumas modificações, como por exemplo, o aumento das opções nas apresentações dos problemas iniciais e o enfoque histórico, o curso é tido como satisfatório diante de uma análise qualitativa.

Todos esses apontamentos fizeram com que optássemos por essa proposta de ensino: a abordagem construtivista, a utilização da história e dos reflexos sociais da ciência, a utilização de problematizações, o alto grau de motivação despertado nos alunos e a abordagem de temáticas conceitualmente fundamentais em detrimento do caráter matemático exaustivo.

No entanto, não achamos que esse módulo de ensino seja adequado integralmente para o EM. Teremos que fazer mais que simples adaptações para que esses pontos positivos permaneçam presentes, pois estaremos lidando com um público diferenciado, e portanto, que possui objetivos próprios e que está amparado numa estrutura acadêmica também singular. Vimos que, pela Transposição Didática, o saber não sofre uma mera simplificação quando passa do nível Universitário para o Médio, pois o projeto social no qual se encontra vinculado é essencialmente diferente. Isso significa que nossa proposta deverá possuir uma metodologia que se adeque ao sistema didático do Ensino Médio.

A NOSSA PROPOSTA

A nossa proposição de ensino da Teoria da Relatividade é uma tentativa, como afirmamos anteriormente, de preservar alguns aspectos da proposta de Angotti et al, mas que esteja em acordo com o EM. Para tanto, sugerimos inicialmente uma utilização maior da história ao longo do processo, no intuito de integrar o aluno ao problema apresentado. Se nos alunos de graduação, os problemas podem estar calcados em experimentos que não correspondem a previsões experimentais; para os alunos do EM, isso não é suficiente. O adolescente não vivencia a prática científica a ponto de se motivar da mesma forma que um futuro cientista. É necessário que o problema tenha um significado, que não deve ser estritamente científico.

Sugerimos, neste caso, a utilização da história durante a problematização, pois acreditamos que o aluno poderá se integrar ao contexto de forma similar a um ator que se integra a uma peça teatral. O que ocorre durante a peça, isto é, as tramas, os conflitos, as dores e os sentimentos em geral são incorporados pelo ator. Fatos sem significado para um expectador se tornam fundamentais para aquele que vivencia a cena. A idéia é que problemas estritamente científicos passem a ser encarados, através da história, como um problema mais amplo, na qual o aluno possa se identificar.

A história assume no nosso propósito, a tarefa importantíssima de promover uma identidade entre aluno e problema.

Outro fator importantíssimo que levamos em consideração na elaboração da proposta se refere ao TEMPO.

A proposta de Angotti et all foi pensada como um módulo fechado sobre Relatividade com uma carga horária média de 17 horas. Se pensássemos nessa possibilidade para o EM, muito provavelmente sugeriríamos a aplicação deste ao final do terceiro ano. No entanto, independente do ano de aplicação, teríamos um conflito entre a extensão deste módulo e a disponibilidade de tempo para trabalhá-lo. Um outro empecilho avistado por nós é o fato de que a inserção através de um “pacote relativístico” seria prejudicial. Vejamos o porquê.

Assumir que a Relatividade seja inserida ao final do Terceiro Ano como um fechamento do Ensino Médio, está atrelado a uma concepção de atualização dos conceitos clássicos, ou ainda a idéia de uma complementação dos conceitos físicos. Esse mesmo papel é assumido pelas leituras suplementares dos livros didáticos. No entanto, como já ressaltamos anteriormente durante a discussão da TD nos livros do EM, essa não é uma forma de pensar e agir coerente com os nossos propósitos, os quais visam a um ensino de Relatividade como obrigatório e indispensável, e não acessório.

Para que o nosso objetivo seja atingido, pensamos numa estratégia de inserções localizadas ao longo dos três anos do Ensino Médio. Cada uma delas aborda um pilar fundamental da Relatividade, a saber: (a) as concepções de espaço e tempo relativísticas; (b) as questões relativas ao éter e campo e, (c) as simetrias das leis físicas, em especial no eletromagnetismo.

Essa tríade possui todos os elementos essenciais da TR. Na primeira, os conceitos relativísticos de espaço e tempo contrastam com a visão clássica. Para mim, dizia Einstein¹⁷⁹, “como me desenvolvi muito lentamente, somente comecei a propor tais questões sobre espaço e tempo quando já havia crescido. Em consequência pude penetrar mais profundamente no interior do problema, o que uma criança de desenvolvimento normal não o teria feito”. Essa declaração surpreendente contém uma valiosa observação: uma criança que se desenvolve normalmente, no processo educativo, em geral não é solicitada a questionar sobre concepções fundamentais do que denominamos realidade, tomando portanto, tudo como natural.

O segundo aspecto da relatividade aborda um tema muito antigo na história da Física: a presença ou não de matéria no espaço. A existência do vácuo total no espaço foi largamente discutida ao longo dos séculos. É de nosso interesse mostrar que o éter sempre foi uma tentativa de negação do vácuo, pois “algo” deveria dar suporte aos fenômenos óticos e eletromagnéticos.

Finalmente, o terceiro ponto fundamental discute sobre as simetrias presentes nas teorias, responsáveis pela coerência, pela perfeição intrínseca das leis que devem reger a natureza. A TR além de ser uma teoria de princípio, o que reforça esse aspecto, foi pensada à partir de assimetrias existentes na teoria eletromagnética clássica.

Sabemos que, em geral, as escolas adotam um currículo da Física que aborda no primeiro ano do EM a Mecânica, no segundo ano a Termodinâmica e a Ótica, e no terceiro ano a Eletricidade, o Magnetismo e o Eletromagnetismo. Essa seqüência preferencial dos conteúdos permite uma inserção que condiz com temas a serem tratados. O primeiro ano, por exemplo, é propício para a introdução das novas concepções de espaço e tempo. O segundo ano, para o episódio histórico do éter e do campo e, finalmente, no último ano, as simetrias forneceriam um excelente pretexto para uma discussão mais geral a respeito da epistemologia científica. Dimensionamos cada módulo com uma carga horária máxima de 10 horas. Isto permitiria que ele fosse tratado em três semanas numa escola pública com três aulas semanais – totalizando nove horas – ou numa escola particular com quatro aulas por semana.

¹⁷⁹ In Mourão (1997), pp. 17

Cada módulo possui peculiaridades, no entanto, todos eles seguem determinadas etapas que objetivam determinadas metas. Descrevere-mo-las abaixo e, em seguida, detalharemos a adequação destas em cada uma das séries do Ensino Médio.

AS ETAPAS:

1ª etapa: Um problema contextualizado historicamente deve ser apresentado ao grande grupo (classe). É importante que neste momento inicial do trabalho não seja feita nenhuma discussão alheia ao entendimento do problema em si, pois as implicações do mesmo ou as possíveis soluções deverão ser confabuladas na segunda etapa do trabalho. Como havíamos relatado anteriormente, o professor deve utilizar a história para inserir o aluno na discussão, fazendo com que este último se sinta cúmplice do processo histórico-científico. Esse recurso deve servir de porta de entrada que possibilitará extrapolar o mero tratamento dos conteúdos físicos, uma vez que remeterá o aluno a uma postura de inquisidor e debatedor, onde as implicações conceituais representam apenas um dos aspectos a ser discutido.

2ª etapa: Depois do problema apresentado, a turma deverá ser separada em pequenos grupos – entre 4 e 6 participantes – para que o problema seja discutido. Cada grupo deverá elaborar um material que explicita: a) os conteúdos físicos envolvidos; b) as implicações do problema na(s) teoria(s) Física(s); c) as implicações, relações e/ou importâncias históricas; e d) sua possível solução. Essa etapa busca efetivar a participação de todos os alunos no processo, exigindo um posicionamento frente ao problema. Espera-se otimizar o detalhamento e o número de propostas apresentadas pelos alunos.

3ª etapa: As idéias de cada grupo deverão ser apresentadas aos outros. Em seguida o professor deverá conduzir as discussões a respeito de cada item. Neste momento se faz necessário enfatizar a diferença de interpretações possíveis frente a um mesmo problema, além de discutir sobre a forma pela qual o meio científico se mobiliza em situações de conflito entre evidências experimentais e

previsões teóricas, por exemplo. As relações existentes entre ciência e sociedade também devem ser exploradas, já que uma influencia diretamente a outra, seja através dos avanços no campo do conhecimento, ou seja às extensões destes na política e na economia.

4ª etapa: O professor deverá apresentar formalmente o ferramental matemático que será utilizado nos exercícios, bem como a articulação deste com os conceitos. Alguns exercícios envolvendo tanto o caráter conceitual quanto o formal deverão ser respondidos pelos alunos. Depois de terminados, o professor deverá corrigi-los junto com a turma. Estes exercícios objetivam avaliar e exercitar os conhecimentos adquiridos pelo aluno ao longo das etapas anteriores. Essa etapa em especial distancia a proposta de um possível caráter meramente qualitativo. À partir do momento em que esta proposta realiza atividades próprias do sistema didático, afasta o lúdico do essencial, o complementar do obrigatório, o desnecessário do necessário.

5ª – A característica desta etapa é a abordagem de dois aspectos essenciais do fazer científico. Por um lado o caráter epistemológico, e por outro, o caráter histórico que ultrapassa os limites da ciência, rumo à sociedade. O intuito é trazer a discussão para o cotidiano do aluno, conscientizando-os do funcionamento da comunidade científica e de seus reflexos na sociedade dentro da qual ele se insere. Através de questões, os alunos deverão discutir aspectos que envolvam os vínculos ciência-sociedade, de forma a mostrar que estes não se restringem a domínios amplos, pois afetam diretamente a cultura e os padrões comportamentais dos indivíduos. Além disso, essa etapa cumpre uma função fundamental em relação ao estigma social do cientista como gênio, que se encontra acima de todos os outros humanos, e que possuem visões privilegiadas da natureza e do universo. Einstein, um ícone representativo desta classe, é veiculado pelos meios de divulgação como um ser supremo, provocando muitas vezes nos alunos, um sentimento de inferioridade prejudicial ao seu desenvolvimento acadêmico. As entrelinhas costumeiramente dizem que para ser reconhecido e aceito na comunidade científica, deve-se realizar grandes feitos, esquecendo muitas das vezes o aspecto progressivo da ciência, segundo o qual

teorias são superadas por outras mais abrangentes. A figura do cientista com jaleco branco, usando óculos e descabelado não pode persistir se quisermos introduzir a física como cultura, que extrapola o laboratório, rumo aos cidadãos.

Desta forma o ciclo concreto-abstrato-concreto também está presente neste trabalho, pois partimos de uma situação historicamente contextualizada (concreto), que deve ser discutida no plano das idéias (abstrato), mas que possui reflexos diretos na vida do aluno (concreto).

Tendo traçado a espinha dorsal do nosso trabalho, partiremos agora para o detalhamento de cada um destes módulos.

1º Ano do Ensino Médio:

Os conteúdos comumente tratados neste período do Ensino Médio são: Cinemática, Dinâmica (Leis de Newton e Lei da Gravitação Universal) e Energia (Energia Cinética, Potencial e Princípio de Conservação da Energia). Em geral, o ensino destes conteúdos segue a ordem acima apresentada. Alguns outros conteúdos, como Hidrostática e Leis de Kepler nem sempre são contemplados, embora façam parte do currículo.

Desta forma, o nosso módulo para este ano deve se encaixar em algum momento desta seqüência, além de não poder ser muito extenso, já que o fator tempo é realmente limitante.

O problema a ser apresentado (1ª etapa), isto é, a porta de entrada para a TR neste ano será o Paradoxo dos Gêmeos. A escolha foi estrategicamente pensada para que se adequasse tanto ao final do estudo de cinemática quanto da dinâmica como um todo – final do ano -, ficando a critério do professor a escolha do momento, desde que já tenha trabalhado alguns conteúdos, a saber: noção de espaço, tempo e referencial.

A contextualização deste paradoxo pode ser feita retratando o momento em que Langevin busca divulgar as idéias de Einstein sobre a TR num meio social em que seus pares não eram ainda adeptos de tal teoria.

A partir deste problema, o professor poderá explorar, juntamente com seus alunos (3ª etapa) inúmeros aspectos, como: a) os conceitos de espaço e tempo

através do Princípio de Relatividade; b) a importância do prestígio de um pesquisador durante a aceitação de suas idéias pela comunidade científica; c) as implicações das novas concepções de espaço-tempo para a mecânica clássica; d) a exploração das “inovações conceituais” por parte de filmes de ficção científica.

É importante salientar que estes pontos levantados não são e não devem ser os únicos, tendo em vista que não é idéia da proposta direcionar muito as discussões a ponto de tolher as idéias dos alunos. Estes pontos são apenas ilustrações daquilo que pode ser discutido ao longo da 3ª etapa do módulo.

Em seguida, está prevista uma série de exercícios que contempla desde questões mais elementares, como o cálculo da contração do espaço ou dilatação do tempo para um observador que se encontra a velocidades próximas à da luz (exemplo dos μ -Mésons), até outras mais sofisticadas, como o “paradoxo do buraco”¹⁸⁰. Com certeza, a efetivação desta lista de exercícios deverá ser precedida de uma breve explanação sobre as Transformações de Lorentz(TL), sem a preocupação da demonstração. No fundo, as TL devem assumir um papel de ferramenta para o aluno, e não de fim, como costumeiramente se faz no curso de Física.

Na derradeira etapa deste módulo, os questionamentos a serem feitos podem ser tais como: quais os mecanismos utilizados pela ciência para difundir suas idéias?; qual a influência dessas idéias na sua vida diária ?; ou ainda, é lícita a postura de Langevin em utilizar (criar) situações sensacionalistas, sendo ele um cientista ?

Atualmente na Biologia, mais especificamente na genética, enfrentamos vivenciamos processos parecidos, através dos quais, a sociedade interfere na ética científica a respeito da utilização dos códigos genéticos em alimentos, ou na clonagem de seres vivos. O caso da ovelha Dolly é um exemplar de uma teoria científica que ultrapassou a comunidade científica e chegou até o campo social.

¹⁸⁰ Esse paradoxo abrange a situação em que um anel se aproxima de uma esfera maciça. O raio interno do anel é o mesmo da esfera. Se adotarmos como referencial o anel, segundo as TL, a esfera deveria ter suas dimensões reduzidas, fazendo com que a esfera consiga atravessar o anel. No entanto, mudando o referencial para o outro objeto, o anel deverá encolher e a esfera não conseguirá atravessá-lo. O material suporte da proposta contempla um artigo que descreve e discute esse paradoxo.

2º Ano do Ensino Médio:

Os conteúdos comumente tratados neste período do Ensino Médio são: Óptica Geométrica, Óptica Física, Termologia, Calorimetria e Termodinâmica, geralmente abordados nessa ordem.

A nossa inserção se encaixa depois da Óptica Física, ou na transição entre esta e a Óptica Geométrica. A nossa proposta, neste ano em especial, assume um caráter similar àquela do primeiro ano, pois aprofunda certos conceitos físicos que são pouco questionados. Se no primeiro ano, espaço e tempo absolutos geralmente são tidos como concepções intuitivas, no segundo, a idéia da luz se propagar num meio não material – o campo - não é questionada pelos professores e, conseqüentemente, também não o é pelos alunos.

A concepção de que deveria existir um meio material para dar suporte às ondas eletromagnéticas esteve muito presente na história da Física e pode-se dizer que ela se vincula a uma idéia ainda mais antiga referente ao vácuo – o “horror ao vácuo”. Nos parece então, que o fato do aluno aceitar que a luz se propaga em um meio imaterial se deve única e exclusivamente à autoridade inerente do professor e dos livros no ensino tradicional: não há problematização, nem discussão sobre este ponto.

Um tópico que tratasse sobre as discussões em torno do éter não poderia ser omitido num módulo sobre a TR, com perspectiva histórica.

A primeira etapa do trabalho se dá portanto, através de um retrato histórico sobre as tentativas “frustradas” de detecção da velocidade da Terra em relação ao éter e que levaram, por um lado, à modificação na Teoria de Lorentz e por outro à proposição da Teoria da Relatividade Restrita. O problema reside então em decidir entre as duas teorias, aquela que deve ser adotada diante da sua coerência interna. Os questionamentos que surgirão devem ser do tipo: qual dessas teorias é mais consistente? Quais as implicações conceituais dessas concepções? Por que se tenta preservar o éter?

Neste módulo, em específico, depois dessas questões serem discutidas em pequenos grupos e do professor encaminhar a discussão geral, não será realizada a quarta etapa, referente aos exercícios. Este é o único módulo que não contempla exercícios que exigem formalismos matemáticos, pois acreditamos que

o formalismo matemático presente nas discussões sobre o éter fogem do nosso escopo. Somado a isso, se encontra o fato dos cálculos não assumirem papel fundamental na distinção das duas teorias discutidas, pois a formulação matemática é quase idêntica nas duas teorias eletromagnéticas, a de Einstein e a de Lorentz.

Partimos então, para a etapa final, na qual as discussões devem girar em torno de cientistas famosos, como Lorentz, Galileo, Einstein e Newton, em relação a um questionamento crucial: a experiência em si, é o ponto crucial de uma teoria? Por que Einstein foi considerado como um revolucionário dentro do meio científico? Se a experiência é suficiente para o estabelecimento de uma teoria, por que esta última sofre modificações profundas de tempos em tempos?

3º Ano do Ensino Médio:

O terceiro ano possui um caráter de encerramento do Ensino Médio, e como tal, deve (pelo menos deveria) contemplar situações de caráter mais geral do ponto de vista teórico. Essa é a concepção que existe por detrás da opção de ensinar o Eletromagnetismo neste período. No entanto, apenas o exercício dos formalismos presentes nas teorias do eletromagnetismo não é suficiente para fornecer ao aluno uma visão mais ampla da Física. Um ponto importante que é deixado de lado em função da metodologia tradicional é a coerência que deve existir numa interpretação dos fenômenos, independentemente do estado de movimento do observador (parado ou com velocidade constante).

A nossa sugestão para o tratamento dessa questão é a abordagem da simetria das leis físicas: o problema principal na apresentação do trabalho original de Einstein e vinculado ao Princípio de Relatividade, o momento relativo entre um ímã e uma espira condutora.

Para a apresentação deste problema aos alunos, como ponto de partida, sugerimos a utilização do momento histórico da famosa formulação de Galileu sobre o Princípio de Relatividade na mecânica, na descrição dos objetos no

navio.¹⁸¹ A partir de então, questionar-se-ia a validade deste princípio para os fenômenos eletromagnéticos.

Durante a quarta etapa deste módulo, o professor deverá tratar questões como: se o PR é válido, e é um dos pilares da TR, como então assumir que o tempo passa mais devagar em um referencial que outro? Qual a interpretação adequada da Experiência de Ampère modificada¹⁸²? Por que a velocidade relativa não deve interferir na natureza do fenômeno?

Na última etapa do trabalho, o aluno deverá ser questionado a respeito da mudança na sua visão de mundo depois da Relatividade. Será que a eterna busca por simetrias é uma característica inerente ao ser humano? Sabemos que o nosso cérebro avalia a *beleza física* de uma pessoa, também pela simetria das formas. As caretas, por exemplo, são assim chamadas pois quebram a simetria do rosto. Nessa perspectiva, residirá aí também a eterna busca do cientista pela *beleza da Física* nas simetrias dos formalismos?

A nossa intenção é que esta proposta seja testada e implantada por professores do Ensino Médio. Foi pensando nisso que apresentamos um material de apoio que servirá de subsídio para a inserção, tornando-a flexível e aberta o suficiente para se adaptar a diferentes situações de ensino.

MATERIAL DE APOIO

O que apresentamos nesta seção é fruto de uma pesquisa e seleção de diversos materiais sobre a Teoria da Relatividade. Achamos importante disponibilizá-los, em vez de fornecer apenas a bibliografia, pois isso facilitará enormemente o trabalho daquele que se dispôr a testar nossa proposta. Além dessa apresentação, sugerimos na forma de tabela uma possível estruturação das etapas com seus respectivos textos.

Nem todos os materiais apresentados devem ser utilizados durante a aplicação da proposta. Alguns deles foram pensados como um aprofundamento ou enriquecimento dos conhecimentos sobre o assunto. A nossa sugestão quanto à aplicação desse material, separada por etapas e anos, segue abaixo:

¹⁸¹ MARTINS (1986)

¹⁸² EISEBERG (1982)

Etapa	1º Ano	2º Ano	3º Ano
1ª	15, 17, 33	12, 14, 31, 34	30, 5, 15
2ª**			
3ª	7, 11, 28, 29, 30, 34	11	11, 20
4ª	16, 18, 25		28, 29
5ª	7, 21, 26, 23	10, 13, 21, 7	1, 19, 25, 21
Aprofundando	1, 2, 3, 4, 5, 22, 29, 32, 24, 35, 36	8, 9, 22, 35, 36.	6, 22, 23, 24, 26, 35, 36.

** A etapa 2 não possui, a priori, nenhum material vinculado pois a dinâmica pressupõe uma atividade maior dos alunos ao discutirem, entre si, alguns aspectos referentes ao tema.

Os materiais sugeridos nessa tabela são descritos abaixo, a partir de um breve resumo, às vezes comentado. A versão completa do material se encontra disponível no CD-ROM, cujas informações de utilização se encontram em anexo.

Material 01: Trecho do livro de Amoroso Costa

Ref: COSTA, Manoel Amoroso. **Introdução à Teoria da Relatividade**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1995.

Este texto é a transcrição de um artigo publicado pelo autor em *O Jornal* (19/03/1922), e trata sobre os conceitos de espaço, tempo e realidade. O autor faz uma análise sobre a relação entre geometria e filosofia, posicionando esta última como uma interpretação dos símbolos e das raízes profundas dos postulados estabelecidos pela ciência.

Material 02: Artigo do American Journal of Physics

Ref: CHAI, An-ti. **Some pitfalls in special relativity**. American Journal of Physics, v. 41, n. 2, p. 192-195, Feb. 1973.

Alguns equívocos são cometidos durante a abordagem de problemas referentes à Teoria da Relatividade Restrita. Neste artigo, o encontro entre duas espaçonaves é utilizado para ilustrar essa prática. Acredito que este artigo esclareça algumas dúvidas freqüentes durante o tratamento de problemas

relativísticos, além de alertar para alguns pontos importantes durante a transformação das coordenadas de um referencial para outro.

Material 03: Home Page

Ref: BETZ, Michel. http://www.if.ufrgs.br/~betz/space_time/index.html#Conteúdos

Segundo o autor, "o presente texto apresenta os aspectos essenciais da Teoria da Relatividade Restrita, no que diz respeito às propriedades do espaço e do tempo". A abordagem adotada neste texto utiliza situações envolvendo a emissão e a recepção de pulsos de luz. Para cada situação, além de uma análise geral, é fornecida uma ilustração numérica amparada numa visualização gráfica. A principal ferramenta utilizada pelo autor durante a abordagem dos conteúdos é o fator K de Doppler, uma quantidade fundamental que caracteriza a relação entre observadores em movimento relativo retilíneo e uniforme. O texto conta ainda com uma ilustração numérica e diagrama de Minkowski.

Material 04: Artigo que propõe uma forma de ensinar a TRR

Ref: BOAS, Mary. Event as the key to a graphic understanding of special relativity. **American Journal of Physics**, v. 47, n.11, p.938-942, nov.1979.

Este artigo discute um método considerado útil num curso de relatividade para não-cientistas, enfatizando argumentos lógicos em contraposição à memorização de fatos. No momento em que as Transformações de Lorentz deveriam ser discutidas, os autores optam por esboçar diagramas de dois sistemas, o primeiro relacionando S e t, enquanto o segundo, S' e t'. Cada par de esboços é relacionado por um evento comum. Alguns exemplos específicos ilustram o método.

Segundo os autores, existem três formas de enfrentar o problema encontrado pelos alunos em aceitar resultados que contradizem seu senso (dificuldades conceituais):

- 1) enterrar os resultados num formalismo matemático;
- 2) afirmar os resultados, misteriosa e inexplicadamente;

3) despojar-se dos detalhes matemáticos e empurrar os estudantes para conflitar suas formas de pensar para um entendimento do assunto.

Os autores defendem a idéia de um curso que inicie com uma discussão sobre "senso comum", levando os estudantes a reconhecer que ele (senso comum) pode enganá-los numa área nova. Assim, a discussão cuidadosa é essencial.

Na primeira parte do curso são discutidas as idéias básicas: sistemas inerciais, os dois postulados, dilatação do tempo, contração de Lorentz (obtida por uma discussão geométrica de trens, relógios de luz, etc.), e importantes experimentos. Antes de introduzir os diagramas é necessário que os estudantes

saibam sobre o fator gama = $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$ e entendam a equação da contração de

Lorentz e a equação da dilatação do tempo, no entanto, não é necessário que saibam as transformações de Lorentz.

Nos parece que este artigo pode ser valioso na compreensão de alguns exercícios muito utilizados pelos livros textos em geral. A opção pelo diagrama faz com que o conceito de simultaneidade se torne mais claro, e se bem compreendido evita os possíveis erros durante a aplicação do formalismo matemático. Além disso, esse material serve de apoio ou alternativa para o professor durante a interpretação dos fenômenos, principalmente quando estes forem objeto de estudo na classe.

Material 05: Artigo sobre colisões relativísticas

Ref: MORENO, R. A. & Ferreira, G. F. Leal. Reversibilidade em Colisões Relativísticas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 22, no. 2, Junho, 2000.

Neste artigo, como o próprio autor expõe, "mostra-se explicitamente que as velocidades relativas entre massas em colisão relativista unidimensional elástica (e não velocidades relativas calculadas em referenciais) são preservadas. Faz-se

também um estudo da colisão relativística unidimensional e uma breve incursão ao choque plano”.

Do ponto de vista didático, o formalismo adotado neste artigo para colisões unidimensionais não é tão complexo, de forma que este não configura um entrave caso o professor queira abordar este tópico no ensino médio.

A proposta apresentada por nós não contempla este tópico, pois não achamos que este assunto seja fundamental no aprendizado da TRR. A disponibilização deste material se deve ao fato de achar que este deve, por um lado subsidiar as reflexões do próprio professor sobre a TRR e, por outro, enriquecer as discussões que podem (e devem) aparecer ao longo do ensino da TRR.

Material 06: Home Page

Ref: <http://www.pcarv.pro.br/einstein.htm>

Esta página da internet traz várias informações sobre a biografia de Einstein, bem como sobre a TRR. No entanto, a informação mais importante, ao meu ver, desta página é o quadro que expõe o depoimento de Einstein sobre a relação massa-energia. Ouvir um trecho do discurso de Einstein sobre a sua própria teoria não é algo muito comum, você não acha?

Infelizmente o link da página não ficou válido quando a mesma foi salva, isto é, a gravação da voz do Einstein deve ser escutada executando o arquivo em separado "einsteinvoz.wav", caso o leitor queira trabalhar off-line (sem conectar na internet). A home page foi gravada mesmo sem estar com o link válido pelo fato de conter a tradução do discurso.

Material 07: Entrevista com o filósofo francês Michel Paty

Ref: VIEIRA, Cassio Leite. O Século de Einstein. **Revista Ciência Hoje**, vol. 28, n. 166, p. 8-12

Neste artigo, o repórter Cássio Leite Vieira entrevista o filósofo francês Michel Paty. As questões centrais da reportagem giram em torno de alguns temas, como por exemplo, a origem da popularidade de Einstein (incluindo o

episódio do eclipse de 1919), a filosofia de Einstein e a relação entre mídia, ciência e sociedade. Este artigo possui uma linguagem clara e apresenta idéias importantes para aquele que queira compreender um pouco sobre a figura do Einstein na sociedade e na comunidade científica.

Material 08: Artigo que propõe uma experiência para medir a velocidade da luz.

Ref: MELO, A. Almeida & Lopes, J. Sousa. A velocidade da luz: uma experiência de demonstração. **Gazeta de Física**, vol. VI, fasc. 1, pg. 18-21, fev. 1978.

Neste artigo, descreve-se uma experiência relativamente simples para determinação da velocidade da luz. "Impulsos luminosos provenientes de uma fonte pulsada são detectados num fotomultiplicador; os impulsos eléctricos correspondentes à detecção dos impulsos de luz são visualizados num osciloscópio que é disparado em sincronismo com o instante da emissão luminosa. À medida que a luz percorre distâncias maiores até atingir o fotomultiplicador, os impulsos visualizados no osciloscópio deslocam-se, em correspondência, no respectivo écran".

Essa experiência pode ser compreendida por professores e alunos do Ensino Médio que tenham curiosidade sobre as formas de se determinar a velocidade da luz. O material utilizado realmente não é tão difícil de ser conseguido, de forma que sua reprodução não se torna tão complexa.

Quanto à aplicação da proposta de inserção da Relatividade, em nenhum momento é sugerida a realização de experiências como essa, no entanto, cabe ao professor adaptar o proposto às suas condições e necessidades. Uma experiência dessa no Ensino Médio não nos parece, a priori, contundente, nem tampouco relevante a ponto de se fazer necessária a sua realização durante a abordagem da TR.

Material 09: Artigo que sugere uma experiência para diferenciar os efeitos Doppler da luz e do som.

Ref: SCHIEL, D., et. Al. Measurement of acoustical second-order doppler effect as an introductory experiment to special relativity. **American Journal of Physics**, v. 46, n. 3, p. 211-3, mar. 1978.

"Uma abordagem diferenciada é sugerida na introdução da relatividade especial. Essa abordagem utiliza a distinção entre o efeito Doppler para o som e para a luz. No efeito Doppler para o som, a diferença na frequência quando o observador está em movimento não é a mesma quando o emissor está em movimento. Isso já é exibido na segunda ordem para o som, mas para a luz não existe variação em nenhuma ordem. Um experimento satisfatório para laboratórios universitários avançados tem sido projetado o qual pode detectar essa diferença de segunda ordem na variação acústica. O sistema observador (microfone) ou emissor (caixa de som) é montado num trilho de ar e as medidas são feitas com um medidor de frequências especialmente construído. A expressão teórica para a variação foi confirmada em nosso laboratório para velocidades de 3 a 7m/s com frequência emitida igual a 40 kHz."

Material 10: Artigo que discute a relação entre teoria e ciência.

Ref: PLEITEZ, V. Quando uma experiência é crucial?. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 21, no 2, Junho, 1999, p. 255/263

Neste artigo, segundo o autor "ainda que aceitemos que a Física é, em última instância, uma ciência experimental, a relação teoria-experimento está longe de ser trivial. Qualquer experiência é sempre interpretada num determinado contexto teórico e, pela sua vez, uma experiência pode lançar novos desafios teóricos. Assim, não podemos dizer sem ambigüidade quando uma experiência é crucial".

Os comentários tecidos pelo autor ao longo do artigo propiciam, mesmo que sem muito rigor, uma reflexão sobre as relações existentes entre teoria e experimento. Alguns exemplos históricos são citados no intuito de ilustrar este tema, sendo que dentre eles se encontra o episódio do eclipse de 1919, apontado como crucial para a aceitação da Teoria da Relatividade Geral pela comunidade.

Às vezes, a informalidade com que o autor trata o assunto acaba não propiciando uma compreensão mais aprofundada da discussão. Além disso, dos experimentos que são citados, acredito que apenas poucas delas são de domínio dos professores do ensino médio.

Acho que o autor consegue, minimamente, desestabilizar a crença de que a experiência se basta por si, além de conter em si o poder de definir a decisão da comunidade numa bifurcação das interpretações teóricas dos fenômenos.

Material 11: Texto sobre aspectos da TRR.

Ref: EINSTEIN, Albert. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral.** Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

O item 15, abordado nas páginas 41 a 45, Einstein aborda basicamente as leis de conservação da massa e da energia para fenômenos relativísticos e clássicos. Ele mostra que, se na física clássica essas duas leis gerais se encontram independentes, na relativística não. Segundo a TRR, existe uma relação entre essas leis de tal forma que, se v for muito pequena em relação a c , a "simbiose" é desfeita. No item 16, abordado nas páginas seguintes, o autor relata que o número de experiências que corroboram as previsões relativísticas é grande.

Segundo ele, as experiências que fazem da teoria eletromagnética um corpo conciso e coerente são exemplos confirmadores da TRR. Para ele, existem duas classes de fatos experimentais que a teoria de Maxwell-Lorentz só pode acomodar se apelar para hipóteses auxiliares que, em si - isto é, sem utilizar a Teoria da Relatividade -, nos parecem estranhas. A primeira se refere à Origem Relativística da Força Magnética. A segunda se refere às inúmeras tentativas de se detectar o movimento da Terra no espaço, entre elas a de Michelson-Morley.

Material 12: Texto sobre Lorentz

Ref: CARVALHO, Romulo. No Primeiro Centenário de Lorentz. **Gazeta de Física**, vol. II, fasc. 10, pg. 275-277, abr. 1953.

Este artigo relata um pouco da contribuição deste cientista para o avanço científico da época. Modificando as interpretações sobre a natureza dos fenômenos eletromagnéticos e óticos de Fresnel e Maxwell, Lorentz propôs a teoria do elétron que explicava os fenômenos conhecidos até então, bem como outros inéditos na época. No entanto, ao se deparar com o resultado "negativo"

da experiência de Michelson-Morley, Lorentz e Fitzgerald modificaram a cinemática newtoniana, inserindo a contração do espaço e o "tempo local". Logo em seguida, Einstein revolucionaria as interpretações "Lorentzianas" ao propôr a Teoria da Relatividade Restrita.

Material 13: Texto do Galileu sobre a medição do valor da velocidade da luz.

Ref: PROVIDÊNCIA, J. Introdução à relatividade restrita. **Gazeta de Física**, vol. VI, fasc. 1, pg. 13-17, fev. 1978

Estas páginas constituem parte de um artigo sobre relatividade. O "Diálogo sobre a velocidade da luz" é um trecho da obra "Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de duas novas Ciências" de Galileo Galilei, publicada em Leiden em 1638. Os três personagens, Sagredo, Simplicio e Salviati confabulam sobre a possível instantaneidade da velocidade da luz. É importante notar a forma com que os raciocínios são expostos, bem como os recursos disponíveis na época para se "medir" a velocidade da luz.

Material 14: Texto sobre o éter.

Ref: PIETROCOLA, Maurício. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol. 10, n.2: p. 157-172, ago. 1993.

"Neste artigo discutiremos o contexto histórico e epistemológico de uma hipótese sobre o arrastamento parcial do éter luminoso pelos corpos. Ela foi apresentada por Fresnel em 1818 para explicar o resultado nulo de uma experiência sobre a refração da luz em um prisma em movimento. Esta hipótese tornou-se muito utilizada ao longo do século XIX, constituindo-se em suporte teórico poderoso na interpretação de fenômenos ópticos, sendo mesmo incorporada por Lorentz na sua teoria eletromagnética de corpos em movimento".

Material 15: Artigo sobre as interpretações do movimento relativo ao longo da história.

Ref: BASSALO, José M. Aspectos Históricos das Bases Conceituais das Relatividades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 19, n. 2, jun. 1997, pgs 180/188.

"Desde a Antiguidade até hoje, o Homem procura entender o movimento de corpo em relação a um outro em movimento uniforme ou acelerado, movimento relativo esse que é a base conceitual das Relatividades (Restrita e Geral). Neste artigo, vamos mostrar como se deu a evolução dessa procura, examinando os trabalhos de Zenão de Eléia, Giordano Bruno, Galileu, Newton, Clairaut, Euler, Coriolis, Mach e Einstein".

Material 16: Sub-diretório BuracoEsfera

Ref: MARTINS, Roberto. Length paradox in relativity. **American Journal of Physics**, v. 46, n. 6, p.667-70, Jun. 1978.

"A aparente contradição interna da relatividade especial em experiências de pensamento, onde um corpo tenta atravessar uma fenda, não tem uma solução tão simples quando o objeto é tridimensional, quanto ocorre nos idealizados em corpos uni ou bidimensionais. Nos usamos o caso especial dessa nova situação para exemplificar o método geral por meio do qual qualquer paradoxo pode ser analisado, e se mostrar que não existe contradição real".

Em nossa proposta, os paradoxos ocupam um espaço relevante, pois os apontamos como uma forma de avaliar a compreensão à respeito da TR. O autor, neste artigo, além de solucionar a aparente contradição, confirma a nossa opinião à respeito da importância do entendimento dos princípios da TR.

Material 17: Artigo ilustrativo sobre o Paradoxo dos Gêmeos

Ref: Revista SuperInteressante Coleções. **Tempo**. Editora Abril, vol. 5, 1999, p. 8-9

Esta reportagem, além de ilustrar o paradoxo dos gêmeos, traz algumas informações que denotam claramente o tipo de transposição realizada por este meio de divulgação da ciência.

O fato de utilizar fotos duplicadas do ator Brad Pitt como sendo dois irmãos gêmeos, demonstra o artifício utilizado pela reportagem no intuito de atrair a atenção do público em geral. Provavelmente, se no lugar do ator estivesse um físico teórico, ou o próprio criador do paradoxo dos gêmeos, Langevin, o público não o reconheceria ou ainda não teria chamado a atenção.

No texto logo abaixo da foto de Einstein, a idéia de um gênio, de um revolucionário, cujas "idéias viraram a Física de cabeça para baixo", é reforçada. Como se isso não bastasse, a idade de 26 anos aparece, mostrando a tenra idade de Einstein ao formular a TR.

Ao longo dessas reportagens fica clara a opção pela informação em contraposição à formação.

Nos parece que o cientista não deve ser encarado como o gênio que foi capaz de enxergar a verdade, nem tampouco, como aquele que foi perfeito o suficiente para realizar o experimento da maneira correta e precisa.

Os cientistas também enfrentam várias dificuldades ao longo do processo, e com certeza têm motivação o suficiente para dar continuidade, persistindo em sua prática.

A sensação gerada pela imagem freqüentemente passada é a de que o aluno acaba sendo inferiorizado, chegando às vezes, a ponto de desistir da física por não se achar capaz o suficiente para tirar boas conclusões. Provavelmente o caminho ensejado seja o de mostrar que cientistas são falíveis, e que a beleza do seu trabalho não reside em uma predisposição genética, e sim na paixão e no empenho que investe em sua profissão. E que a contribuição de todos é importante, pois fornece subsídios para aqueles que almejam atingir um olhar mais ao longe e, ao mesmo tempo, mais profundo na natureza.

Enxergar eletros, prótons e nêutrons, ou ainda, viajar num foguete à velocidade da luz não pode, nem deve ser privilégio de poucos.

Material 18: Simulação que ilustra o paradoxo dos gêmeos

Este pequeno aplicativo simula a situação descrita por Langevin, bem conhecida como o paradoxo dos gêmeos. O usuário pode escolher a idade dos irmãos, a velocidade do foguete e a estrela que será visitada. A partir destes dados, o simulador fornece a idade dos irmãos quando aquele que viajara retorna a companhia do irmão. Este aplicativo não chega a ser "interessante", devido ao seu ambiente ser pouco sofisticado, mas ilustra bem o paradoxo dos gêmeos.

Material 19: Invariância

Ref: STEWART, Ian. **SIMETRIA: O FIO DA REALIDADE.** In: As coisas são assim: pequeno repertório científico do mundo que nos cerca. Org. John Brockman, Katinka Matson; trad. Diogo Meyer, Suzana Sturlini Couto. São Paulo: Companhia das Letras. 1997.

O autor define simetria como sendo "a invariância sobre transformação", e a identifica no mundo natural (caramujo, pétalas de uma flor, brilho crescente da lua nova) em várias escalas (do átomo ao universo). Ele aborda os tipos de simetrias existentes, bem como as suas importâncias em várias áreas, seja ela pertencente ao campo científico ou mundo orgânico. A reprodução dos seres vivos, por exemplo, ocorre porque a vida é um fenômeno que se auto-reproduz. Para Einstein, as leis físicas devem ser as mesmas em cada ponto do espaço/tempo. A abordagem utilizada pelo autor nos abre a visão para uma série de questionamentos e observações sobre os padrões existentes nos processos do universo.

Material 20: Texto redigido por Einstein sobre referenciais inerciais.

Ref: EINSTEIN, Albert. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral.** Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

Esse texto sintetiza o valor da TRR na física, no tocante às relações entre referenciais inerciais. As leis da natureza devem ser covariantes em relação às Transformações de Lorentz, tendo em vista os princípios fundamentais da TRR.

Material 21: Entrevista com David Brody e Bryan Magee

Refs: - Revista SuperInteressante. **Uma Síntese dos Feitos da Ciência.** seção Livro do mês, Editora Abril, dez. 1999

- Revista SuperInteressante. **Filosofia com Todo Sentido.** seção Livro do mês, Editora Abril, out. 1999

As entrevistas transcritas nesses documentos relacionam, basicamente, filosofia e ciência. Embora sejam reportagens curtas, ainda assim expõem algumas idéias interessantes para se refletir.

Por exemplo, Bryan Magee ao ser solicitado a dar alguns exemplos de como a ciência mudou nosso modo de pensar, faz referência a questões fundamentais sobre tempo. O longo de sua resposta, afirma que Albert Einstein é um exemplo de cientista-filósofo, pois foi um dos propositores de mudanças sobre noções básicas de o que são os objetos físicos, o que é tempo e espaço.

Material 22: Artigo que apresenta críticas sobre o livro “A Dança do Universo”.

Ref: Martins, Roberto. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 2 - Física Moderna. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 15, n. 3; p. 265-300, dez. 1998.

Segundo o autor, o artigo "discute a dificuldade de apresentar-se conceitos físicos corretos em obras de divulgação científica. Apresenta-se como exemplo uma leitura crítica do livro A dança do universo: dos mitos de criação ao big-bang, analisando-se problemas conceituais da abordagem empregada naquela obra. Mostra-se a existência de grande número de erros, provenientes de uma utilização descuidada de imagens e comparações, erros esses que poderiam ter sido evitados. O presente artigo discute a parte daquela obra referente à física moderna, apenas. A parte referente à física clássica foi discutida em um artigo anterior”.

O trabalho do autor deve ter o seu mérito reconhecido, embora saibamos que a opção por publicar um livro acessível ao público em geral, faz com que erros conceituais acabem sendo cometidos. Acredito que este seja o preço necessário para tornar a linguagem acessível a todos e, antes de tudo,

compreensível. Encontrar um ponto de equilíbrio entre a fidelidade teórico-científica e a acessibilidade do conhecimento é uma arte, e portanto, não possui regras definidas.

Cabe ao autor saber ponderar entre esses dois extremos, e ao professor saber separar aquilo que é útil e/ou necessário de ser ensinado ao aluno, mesmo através de senãos.

Material 23: Artigo de Jornal sobre Buracos Negros

Ref: GLEISER, Marcelo. Os buracos negros e a relatividade do tempo. **Jornal A Folha de São Paulo**, Caderno Folha Especial, São Paulo, 01/01/1999.

Neste artigo, o autor tece comentários sobre buracos negros e algumas possibilidades de viagem no tempo e no espaço. Conhecido pelo público em geral pela autoria do livro "A Dança do Universo", Marcelo Gleiser escreve para a folha com o seu estilo agradável e simples, sem perder de todo o rigor para com a teoria.

Em se tratando de um texto de divulgação, o texto não aprofunda muitas questões sobre a Relatividade (e nem poderia), mas explora algumas previsões interessantes da Relatividade Geral, como os "buracos de vermes".

Material 24: Matéria da Revista SuperInteressante sobre Buracos Negros.

Ref: Revista SuperInteressante Coleções. **Tempo**. Editora Abril, vol. 5, 1999, p. 8,16/17

Nestes quadros, são apresentadas ilustrações e informações sobre o "buraco de verme", também chamado de "buraco de minhoca", produzido por um buraco negro e que possibilitaria a viagem no tempo.

Material 25: Trecho do livro do Einstein sobre Relatividade

Ref: Einstein, Albert. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

Páginas 18 a 27:

Neste trecho do livro, Einstein aborda alguns conceitos primeiros da TRR, como o princípio de relatividade, a sua relação com o princípio da constância da velocidade da luz, e ainda o conceito de tempo. Embora exista uma vasta literatura sobre esses princípios, é importante sabermos os argumentos utilizados pelo próprio autor da teoria para que não cometamos o erro do "disse que disse". Além disso, Einstein expõe seus argumentos e raciocínios, como alguém que "pensa alto" sobre um assunto, o que facilita bastante o entendimento pelo leitor.

Páginas 115 a 125:

Neste trecho de seu livro, Einstein expõe algumas reflexões sobre conceitos fundamentais na física. Primeiramente discorre sobre a concepção de tempo, mostrando que este não pode ser encarado como uma grandeza separada do espaço. A posteriori, relata a evolução do conceito de campo, bem como a função das noções de espaço e tempo antes do seu surgimento. A física se transformou ao longo dos tempos, fruto da evolução conceitual de suas bases: espaço e tempo.

Material 26: Trecho do livro do Gamow sobre Física Moderna.

Ref: GAMOW, George. **O incrível mundo da física moderna.** São Paulo: IBRASA, 1980.

Gamow conseguiu "transformar os problemas capitais da física atômica numa história em que a precisão científica se mistura com uma dose de ficção, que permite melhor apreender o essencial dos fenômenos e conceitos tratados por ele. Criou Gamow mesmo um personagem que se tornou famoso, Mr. Tompkins, um funcionário de banco que se sentiu atraído pela ciência moderna.(...)O INCRÍVEL MUNDO DA FÍSICA MODERNA é, pois, uma história alegremente contada que nos ensina coisas fundamentais, que ninguém deve ignorar ao mundo atual, tão fortemente modelado pela ciência." (Contra capa do livro).

Este trecho do livro trata de vários conceitos relativísticos, a saber:

pág 34 a 36 - Relação entre aceleração e tempo (relação com os paradoxos dos gêmeos)

pág 36 a 39 - Simultaneidade

pág 40 a 58 - Curvatura do Espaço, Gravidade e Universo

Material 27: Livro completo do Einstein sobre Relatividade em inglês.

Ref: EINSTEIN, Albert. **Relativity**. 1995

Esse livro foi redigido por Einstein e hoje já se encontra traduzido pela Editora CONTRAPONTO. Alguns trechos do livro em português se encontram nos materiais 11, 20 e 25.

Material 28: Artigo sobre a realidade ou não do tempo relativístico.

Ref: SANTOS, V. H. Relatividade e Realidade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, vol. 3, n. 2, p. 83-84, ago. 1986.

O autor relata uma experiência pessoal ocorrida enquanto ministrava a disciplina Estrutura da Matéria no curso de Física. Um diálogo travado entre professor e aluno sobre a "realidade" ou não do tempo numa situação em que as velocidades envolvidas são comparáveis à da luz é descrito. O que se percebeu foi uma dificuldade encontrada por parte do aluno em aceitar o tempo relativo, talvez fruto de uma crença antiga à respeito da existência de uma verdade absoluta.

Material 29: Artigo sobre o tempo

Ref: SANTOS, V. H. Considerações sobre o tempo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, vol. 4, n. 1, p. 32-33, abr. 1987

Este artigo discute algumas idéias em torno do tema "tempo". O texto é sucinto, mas consegue abordar o "tempo relativístico" com bastante propriedade.

Alguns raciocínios expostos, embora não utilizem o termo de forma explícita, fazem referência a paradoxos como o dos gêmeos.

Material 30: Capítulo de livro sobre a vida de Einstein, e as possíveis contribuições para o surgimento da Teoria da Relatividade.

Ref: MOURÃO, Ronaldo R. **Explicando a teoria da relatividade.** Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

Neste capítulo, o autor relata alguns fatores que poderiam ter contribuído para o surgimento da Teoria da Relatividade. Ele aponta desde a educação que Einstein recebeu, passando pela trajetória de cientista, até as contribuições de amigos de outras áreas do conhecimento. Podemos citar o caso de Michele Ângelo Besso através dos contatos no Departamento de Patentes, e Friedrich Adler, personagem importante da história do socialismo europeu.

Material 31: Capítulo de livro sobre a história do éter

Ref: MOURÃO, Ronaldo R. **Explicando a teoria da relatividade.** Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

Neste capítulo, o autor relata aspectos da história do éter, como por exemplo, algumas argumentações e bases teóricas nas quais a existência do éter se apoiava. Descreve algumas repercussões da experiência de Michelson-Morley no meio científico, posicionando alguns cientistas quanto à crença ou não no éter.

Material 32: Breve capítulo de livro que aborda o tempo como 4ª dimensão.

Ref: MOURÃO, Ronaldo R. **Explicando a teoria da relatividade.** Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

Nestas sucintas duas páginas de livro, o autor conta uma estorinha envolvendo O Viajante do Tempo, principal personagem do romance de ficção científica *A máquina do tempo* de H. G. Wells. Nesta, o personagem expõe a idéia de que o tempo é a quarta dimensão, sem a qual, não se pode definir um evento. “Não se pode separar o espaço do tempo. Só a combinação dos dois – o espaço-

tempo – é que possui uma existência independente. O espaço-tempo é o meio em que ocorrem e sucedem os eventos.” (pg. 40)

Material 33: Capítulo de livro que explica o paradoxo dos gêmeos, o contexto de sua proposição e ainda uma confirmação experimental.

Ref: MOURÃO, Ronaldo R. **Explicando a teoria da relatividade.** Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

Nas páginas 46 a 49, o autor explica o paradoxo dos gêmeos proposto por Langevin, em 1911, por ocasião de uma conferência. Em seguida, expõe uma experiência de comprovação da previsão relativística, ocorrida em 1971, por iniciativa do físico norte-americano J. C. Hafele. O cientista utilizou quatro relógios atômicos, dos quais dois viajaram em sentidos opostos – um para leste e outro para oeste - a bordo de aviões, enquanto os outros dois permaneceram em terra. Ao final da viagem, suas marcações foram comparadas, e evidenciaram o efeito relativístico do tempo.

Nas páginas 54 a 56, o autor cria uma situação hipotética (porém, bem fundamentada), utilizando o paradoxo proposto por Langevin. A intimidade com dados astrofísicos, por parte do autor, fez com que a viagem à estrela de Barnard fosse justificada; surge então, uma discussão entre o astronauta e sua esposa sobre quem ficaria mais velho após a viagem.

Material 34: Texto sobre as confirmações experimentais da Relatividade Geral.

Ref: MOURÃO, Ronaldo R. **Explicando a teoria da relatividade.** Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

No trecho referente às páginas 64 a 67, o autor relata com propriedade alguns episódios que permearam a comprovação experimental da Teoria da Relatividade Geral. Como vimos no capítulo 2, a possibilidade de confirmação do desvio do raio de luz durante o eclipse solar foi motivo de algumas expedições no início do século. Hoje em dia, com a radioastronomia, outros efeitos são observáveis e compatíveis com a previsão relativística.

Das páginas 78 a 85, o autor detalha melhor o episódio ocorrido em 1919, na cidade de Sobral.

Material 35: Cronologia da vida de Einstein

Ref: MOURÃO, Ronaldo R. Explicando a teoria da relatividade. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

Neste capítulo, o autor expõe, de forma cronológica alguns fatos ocorridos na vida de Einstein. Acredito que esse tipo de material deva ser utilizado apenas para que o leitor consiga se situar historicamente, isto é, para ter uma visão geral da vida de Einstein. Para aqueles que sentem dificuldade de situar a ordem dos fatos, essa cronologia ajuda bastante.

Material 36: Fotos e figuras

As fotos e figuras foram obtidas, em sua maioria em sites da internet, e retratam desde situações históricas – como o episódio em Sobral -, até figuras meramente ilustrativas – interferômetro de Michelson-Morley. Elas não ocupam um papel de destaque na metodologia proposta, no entanto, pode auxiliar o professor em algum momento. Mesmo não sendo utilizadas ao longo do ensino, a título de curiosidade e ilustração, com certeza elas se prestarão.

A idéia de uma proposta inovadora e viável de ser implantada no sistema didático atual foi desenvolvida através da superação de vários desafios que, com certeza, não terminam aqui. O esforço em compatibilizar o ensino de um tema diferenciado, com características singulares, num sistema praticamente “mumificado” deve ser continuado por todos nós, professores e pesquisadores em ensino de física.

Planejamos testar e implementar a proposta através de alguma unidade escolar de Florianópolis e, em breve, esperamos compartilhar os resultados com a comunidade acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO, Antônio. **Curso de física**. São Paulo: Scipione, 1997.
2. ALVES, Jerônimo. Teoria da Relatividade no Brasil: Recepção e Contexto. In: HAMBURGER, Amélia Império, et. al. (org.). **A ciência nas relações Brasil-França (1850-1950)**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.
3. ALVETTI, Marcos. **Ensino de física moderna e contemporânea e a Revista Ciência Hoje**. Florianópolis. 1999. 170f.. Dissertação (Mestrado em Educação) – Centro de Educação, Universidade Federal de Santa Catarina.
4. ANDRADE, N. L. Conant e a assimilação da ciência à cultura geral. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 13, n. 1, p. 32 –46, abr. 1996
5. ANGOTTI, José André et. al. Teaching relativity with a different philosophy. **American Journal of Physics**, v. 46, n.12, p.1258-1262, dec. 1978.
6. ARRUDA, S. M.; FILHO, D. O. Laboratório caseiro de física moderna. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 232 – 236, dez. 1991.
7. ARRUDA, S. M.; VILLANI, A. Mudança conceitual no ensino de ciências. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 11, n. 2, p. 88 – 99, ago. 1994.
8. ASTOLFI, Jean- Pierre; DEVELAY, Michel. **A didática das ciências**. 4.ed. Campinas: Papirus, 1995.
9. BACHELARD, Gaston. **A Formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
10. BARRA, E. S. Modelos da mudança científica: subsídios para as analogias entre história da ciência e ensino de ciências. **Caderno Catarinense de ensino de Física**, Florianópolis, v. 10, n. 2, p. 118 –127, ago. 1993.
11. BATTIMELLI – “Teoria dell’Elettrone e Teoria della Relatività: Uno Studio sulle Cause della Scomparsa dassa Prassi Scientifica del Concetto di etere elettromagnetico”. Tese di Láurea, Roma, 1973.
12. BERMAN, M. O ensino de relatividade geral na graduação. São Paulo,

- Revista de Ensino de Física**, v.9, n. 1p. 41-44, out. 1987.
13. BERRET, M. **Lê temps dès études**. Paris: Librairie Honoré Champion, 1975.
 14. BOAS, Mary. Event as the key to a graphic understanding of special relativity. **American Journal of Physics**, v. 47, n.11, p.938-942, nov.1979.
 15. BROUSSEAU, G. Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. **Recherches en didactique des mathématiques**. v. 7, n 2, 1986.
 16. CAFARELLI, Roberto. Einstein no Brasil. In: MOREIRA, Ildeu; VIDEIRA, Antônio (Org). **Einstein e o Brasil**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1995.
 17. CAILLOT, Michel. La théorie de la transposition didactique est-elle transposable? In: RAISKY, Claude; CAILLOT, Michel. **Au-delà des didactiques, le didactique**. Débats autour de concepts fédérateurs. De Boeck Université.
 18. CAMARGO, Antônio José. **A introdução da física moderna no 2º grau: obstáculos e possibilidades**. Florianópolis. 1996. Dissertação (Mestrado em Educação)- Centro de Educação, Universidade Federal de Santa Catarina.
 19. CASTRO, R. S.; CARVALHO, A. M. História da ciência: investigando como usá-la num curso de segundo grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 225 –237, dez. 1992.
 20. CAVALCANTI, Marisa. Estudo de física moderna no ensino médio utilizando a internet: raios cósmicos. In: XIII SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 1999, Brasília.
 21. CHAI, An-ti. Some pitfalls in special relativity. **American Journal of Physics**, v. 41, n. 2, p. 192-195, Feb. 1973.
 22. CHEVALLARD, Yves. **La transposición didáctica: del saber sabido al saber enseñado**. Argentina: La Pensée Sauvage, 1991.
 23. COELHO, S. M. Referências bibliográficas organizadas em didática das ciências. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 181 – 192, dez. 1991.
 24. CÓRDOVA, R. S.; et. al. Simulación computacional de experiências de física moderna. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 2, p. 147 –151, ago. 1992.
 25. COSTA, Amoroso. A Teoria da Relatividade: esboço histórico. **Revista**

- Brasileira de Engenharia**, maio, 1922.
26. COSTA, Isa; SANTOS, Marly. A física moderna e contemporânea na sala de aula da escola média. In: XIII SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 1999, Brasília.
27. _____ A FMC na escola média: uma estratégia de mudança na prática docente. In: VI ENCONTRO DE PESQUISA DE ENSINO DE FÍSICA, 1998, Florianópolis.
28. _____ A física moderna e contemporânea na escola média: avaliação de uma proposta por alunos. In: XIII SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 1999, Brasília.
29. CUSTÓDIO, Alexandre. É possível levar a física quântica para o ensino médio. In: XIII SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 1999, Brasília.
30. DELIZOICOV, Demétrio; ALVETTI, Marco. Ensino de física moderna e contemporânea e a revista Ciência Hoje. In: VI ENCONTRO DE PESQUISA DE ENSINO DE FÍSICA, 1998, Florianópolis.
31. EDITORA ABRIL. **Super Interessante:10 anos de revista em um CD-ROM**. São Paulo: Abril Multimídia, 1997, CD-ROM.
32. EINSTEIN, Albert. **Como Vejo o Mundo**. São Paulo: Círculo do Livro Ltda, 1998
33. _____ **Notas autobiográficas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1959.
34. _____ Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. 1905.
35. _____ **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
36. EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. **A evolução da física**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.
37. EISEBERG, Robert M. & LERNER, Lawrence S. **Física: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1982, 4.v.
38. FEYNMAN, Richard Phillips. **The Feynman lectures on physics mainly mechanics, radiation, and heat**. vol. 1, Estados Unidos da América: Fondo Educativo Interamericano, S.A., 1971.
39. FILHO, Aurélio Gonçalves; TOSCANO, Carlos. **Física e realidade**. São Paulo: Scipione, 1997.
40. FISHBONE, Leslie. Einstein's ideas: a course on special relativity for general

- students. **American Journal of Physics**, v. 46, n. 7, p. 700-4, Jul. 1978.
41. FOUREZ, Gerard. **A construção das ciências: introdução à filosofia e à ética das ciências**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995.
42. _____. **Alfabetización científica y tecnológica**. Buenos Aires: Ediciones Colihue, 1994. (Colección Nuevos Caminos).
43. FREIRE, Luiz de Barros. As teorias de Einstein. In: CONFERÊNCIA GABINETE PORTUGUÊS DE LEITURA, abril, 1924, Recife.
44. _____. Um interessante aspecto da theoria da relatividade. **Boletim de Engenharia**, Recife, v.2, , 1922.
45. GLEISER, Marcelo. **A DANÇA DO UNIVERSO: dos mitos de criação ao Big-Bang**. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
46. HELM, Hugh; GILBERT, John. Thought experiments and physics education: part 1. **Physics education**, v. 20, n.3, p.124-31, may, 1985.
47. HEWSON, Peter. A case study of conceptual change in special relativity: the influence of prior knowledge in learning. **European Journal of Science Education**, v. 4, n.1, p.61-78, Jan/mar, 1982.
48. HOLTON, G. Einstein, Michelson and the crucial experiment. In: HOLTON, G. **Thematic origins of scientific thought**. Cambridge: Harvard Univ. Press, 1973,
49. JAPIASSÚ, Hilton. **Para ler Bachelard**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1976.
50. JOSHUA, Samuel; DUPIN, Jean-Jacques. **Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques**. aris PUF, 1993
51. KAMMER, D. W.; SHALTIS, L. W.. Some ideas for the poets' physics' laboratory. **American Journal of Physics**, v. 41, n. 2, p.178-180, Feb. 1973.
52. KEOHANE, K., et. al. Ciência nova e velhas culturas **Revista brasileira de física**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 267-297, abr. 1978.
53. LANDAU, L. D. ; RUMER, IU. B.. **O que é a Teoria da Relatividade**. Editora MIR, (Série A Ciência ao Alcance de Todos).
54. LECORNU, Léon. Quelques remarques sur la relativité. **Comptes-rendus de l'académie des sciences**, Paris, n. 174, p.337 – 342, 1922.
55. LORENTZ, H. A. **The theory of electrons and the propagation of light**.

- Nobel Lecture, 1902.
56. _____ Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light. In: **The principle of relativity**. Amsterdam: Royal Acad., 1904, p. 809-834.
57. MARINHO, Roberto. “Resposta a Algumas Objeções Levantadas entre Nós sobre a Teoria de Einstein”. *Revista de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 1, p. 12-24, Rio de Janeiro, 1926.
58. MARTINAND, J.L. **Connaître et transformer la matière**. Berna: Peter Lang, 1986.
59. MARTINS, R. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 15, n.3, p. 265 –300, dez. 1998.
60. _____ The mass-velocity relation in special relativity, **Revista Brasileira de Física**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 315- 329, ago. 1980.
61. _____ .Length paradox in relativity. **American Journal of Physics**, v. 46, n. 6, p.667-70, Jun. 1978.
62. _____. Galileo e o princípio da relatividade. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, p.69-86, 1986.
63. MATHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164 –214, dez. 1995.
64. MCKELVEY, John; GROUCH, Howard. **Física**. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1981.
65. MENEZES, Luiz Carlos (coord.). **PCN do Ensino Médio**, Parte III – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2000, disponível em: <http://www.mec.gov.br/semtec/ensmedio.shtm>, acesso em 28/11/2000.
66. MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino do método científico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 10, n. 2, p. 107 –117, ago. 1993
67. MORIZE, Henrique. Resultados obtidos pela Comissão Brasileira do Eclipse de 29 de maio de 1919. **Revista de Ciências**, v.4, n.1, maio/jun. p. 65-81.
68. MOURÃO, Ronaldo Rogério. **Explicando a Teoria da Relatividade**. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

69. NETO, A. D.; JABLONSKI, F. J. Nascimento, vida e morte das estrelas. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v. 1, n. 2, p. 25-32, out. 1979.
70. NETO, A. D.; JABLONSKI, F. J. Nascimento, vida e morte das estrelas (2ª parte). São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v. 2, n. 1, p. 36-52, fev. 1980.
71. NEWTON, Isaac. **Princípios matemáticos de la filosofia natural**: introducción y libro I. Tradução de Eloy Garcia, Madrid: Alianza Editorial, 1987.
72. OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. 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**, Florianópolis, v. 16, n.3, p. 267 –286, dez. 1999.
73. OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antônio. Partículas elementares e interações fundamentais no ensino médio de física: uma experiência a partir do estágio de um aluno de “prática de ensino de física” da UFRGS”. In: II ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 1999, Valinhos. Florianópolis: OPM CED/ UFSC, 1999, CD-ROM.
74. _____. Tópicos de física contemporânea na escola média: um estudo com a técnica Delphi. In: VI ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 1998, FLORIANÓPOLIS.
75. PATY, Michel. A recepção da relatividade no Brasil e a influência das tradições científicas européias. In: HAMBURGER, Amélia Império, et. al. (org.). **A ciência nas relações Brasil-França (1850-1950)**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.
76. _____. O século de Einstein. **Revista Ciência Hoje**. Rio de Janeiro, n. 166, n. 28, p.8-12, nov. 2000.
77. PAULI, W. **Física e conoscenza**. Boringhieri, 1962
78. PAULO, Iramaia Jorge Cabral de. **Elementos para uma proposta de inserção de tópicos de física moderna**. Cuiabá. 1997. Dissertação (Mestrado em Enfermagem) – IE, Universidade Federal de Mato Grosso.
79. PEREIRA, O da S. **Raios cósmicos**: introduzindo física moderna no segundo grau. São Paulo. 1997. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física e faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.

80. PETITJEAN, Patrick. Le groupement des universités et grandes écoles de France pour les relations avec l'Amérique Latine, et la création d'instituts a Rio, São Paulo et Buenos Aires (1907 – 1940). In: SEGUNDO CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 1989, São Paulo. São Paulo: Nova Stella. p. 428-442.
81. PIETROCOLA, Maurício. A extensão do princípio de relatividade à óptica. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA, 1993, Caxambu.
82. _____. Fresnel o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da terra sobre a propagação da luz. **Caderno de Ensino de Filosofia**, v.10, n. 2, p.157-172, ago. 1993.
83. _____. O éter luminoso como espaço absoluto. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, Série 3, v. 3, p. 163-182, jan./dez. 1993.
84. _____.; RODRIGUES, Carlos Daniel. Uma análise crítica à abordagem da teoria da relatividade restrita em livros de física básica. In: XII SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 1997, Belo Horizonte.
85. PIETROCOLA, Maurício; ZYLBERSTAJN, Arden. O uso do princípio de relatividade na interpretação de fenômenos por alunos de graduação em física. V ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 1996.
86. _____. The use of the Principle of Relativity in the interpretations of phenomena by undergraduate physics students. **International Journal of Science Education**, v. 21, n. 3, p. 261-276, 1999.
87. PINHO, José; "Atividades Experimentais: do Método à Prática Construtivista". Florianópolis. 2000. 298f.. Tese (Doutorado em Educação) – Centro de Educação, Universidade Federal de Santa Catarina.
88. PINTO, C. A.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n.1, p. 75 –34, abr. 1999.
89. RAMALHO, Francisco. **Os fundamentos da física**. 6.ed.São Paulo: Editora Moderna, v. 2, 1994.
90. ROBILOTTA, M. R.; SALÉM, S. **Apostila de física 4**. São Paulo: Instituto de Física USP, 1981
91. RODRIGUES, Carlos Daniel; PIETROCOLA, Maurício. Abordagem da relatividade restrita em livros didáticos do ensino médio e a transposição

- didática. In: II ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA E EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 1999, Valinhos. Florianópolis: OPM CED/ UFSC, 1999, CD-ROM.
92. ROSSER, W. G. V.. Recent changes in the teaching of special relativity. **Physics education**, v.14, n.4, p.213-16, may, 1979.
93. SÁBATO, E.. **Nós e o universo**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1985.
94. SANTOS, V. H. Comentários sobre massa e energia. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.4, n. 3, p. 156-157, dez. 1987.
95. _____. Considerações sobre o tempo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 32-33, abr. 1987.
96. _____. Relatividade e realidade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 3, n. 2, p. 83-84, ago. 1986.
97. SCARMINIO, J. Observações de discordâncias: possíveis experiências em laboratórios de física moderna. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v.7, n. 2 p. 21-28, dez. 1985
98. SCHIEL, D., et. Al. Measurement of acoustical second-order doppler effect as an introductory experiment to special relativity. **American Journal of Physics**, v. 46, n. 3, p. 211-3, mar. 1978.
99. SHANKLAND, R. S. Conversations with Albert Einstein. **American Journal of Physics**, v. 31, n. 1, p. 47-57, 1963.
100. SILVA, Andréa Bindel. **Relatividade cinematográfica**. São Paulo: Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 1987.
101. SILVA, Djalma Nunes. **Física**. São Paulo: Parma, 2000.
102. SOSOUME, Yassuko; KAWAMURA, Maria; MENEZES, Luis. A física na reforma do ensino médio. VI ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 1998, Florianópolis.
103. STRNAD, Janez. A stepwise approach to special relativity. **Physics Teacher**, v. 17 n. 8, p.522-24, Nov. 1979.
104. TERRAZAN, Eduardo. **Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média**. São Paulo, 1994. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo.
105. _____. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2 grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**,

- Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209 –214, dez. 1992.
106. _____; STRIDER, Dulce Maria. Atualização curricular e ensino de física na escola média. In:VI ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 1998, Florianópolis.
107. _____ TIPLER, Paul. **Física**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1984.
108. VALADARES, E.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico., laser e emissão de corpo negro. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 121 –135, ago. 1998.
109. VILLANI, A. A visão eletromagnética e a relatividade: I a gênese das teorias de Lorentz e Einstein. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v.7, n. 1 p. 51-72, jun. 1985a.
110. _____ A visão eletromagnética e a relatividade: II o desenvolvimento das teorias de Lorentz e Einstein. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v.7, n. 2 p. 37-74, dez. 1985b
111. _____. Análise de um curso de introdução à relatividade. . São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v. 2, n. 1 , p. fev. 1980.
112. _____. Dilatação do tempo e contração das distâncias: uma discussão didática. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v.6, n. 1, p. 3-17, abr. 1984.
113. _____. O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações – parte II. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v. 3, n. 2, p. 55-76, jun. 1981.
114. _____. O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v. 3, n. 1 , p. 31-45, mar. 1981.
115. _____ Reflexões sobre o ensino de física no Brasil: práticas, conteúdos e pressupostos. São Paulo, **Revista de Ensino de Física**, v.6, n. 2, p. 76-96, dez. 1984.
116. _____; ARRUDA, S. Sobre as origens da relatividade especial: relações entre quanta e relatividade em 1905. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 13, n. 1, p. 32 –46, abr. 1996.
117. _____. A visão eletromagnética e a relatividade: a gênese da teorias de Lorentz e Einstein”. **Revista de Ensino de Física**, v. 7, n.1, jun. 1995.
118. _____. A visão eletromagnética e a relatividade: o desenvolvimento das

- teorias de Lorentz e Einsten. **Revista de Ensino de Física**, v. 7, n. 2, dez. 1985.
119. _____;ARRUDA, Sérgio. Inserção da física moderna no 2º grau: problemas e perspectivas. In: VI ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 1998, Florianópolis.
120. WHITTAKER, E. **A history of the theories of ether and electricity**. London, 1953.
121. ZANETIC, João. **Física também é cultura**. São Paulo. 1980. 252f.. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.
122. ZIGGELAAR, A. Teaching special relativity. **Physics Education**, v.10, n.5, p.361-363, Jul. 1975.
123. ZYLBERSZTAJN, A. A deflexão da luz pela gravidade e o eclipse de 1919. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 6, n. 3, p. 224 – 233, dez. 1989.

ANEXO

INSTRUÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DO CD-ROM

O CD-ROM se encontra montado numa estrutura de diretórios, sub-diretórios e arquivos. Vejamos algumas informações sobre cada um deles:

- Cada diretório configura um tema específico e serve para agrupar os arquivos em comum. O primeiro deles – Aprofundando - por exemplo, reúne informações sobre a TRR que exigem um formalismo mais acurado, ou ainda, utilizam uma terminologia mais sofisticada.
- Os sub-diretórios separam os conteúdos segundo a fonte. Para que os arquivos não ficassem misturados, os separamos segundo esse critério e atribuímos o nome ao assunto específico em questão.
- Os arquivos são dos mais variados tipos: figuras, aplicativos, home pages ou ainda textos. No entanto, impreterivelmente, em todos os subdiretórios existirá pelo menos um arquivo texto chamado **LeiaMe_nome do sub-diretório**, que descrevem os conteúdos dos arquivos residentes naquele sub-diretório, no intuito de possibilitar ao usuário um resumo e, às vezes, alguns comentários sobre os mesmos. Quando os arquivos forem do Internet Explorer/Netscape, o usuário deve abrir aquele que possui o nome idêntico ao do subdiretório e então navegar normalmente pelo site sem necessidade de se conectar a internet.

Pode-se perceber que a estrutura apresentada no CD-ROM difere daquela exibida no material de apoio. Para que o professor possa saber a correspondência entre o número do material e o diretório do CD, montamos a seguinte tabela:

Número do Material	Diretório	Sub-diretório
1	Aprofundando	AmorosoCosta
2	Aprofundando	Armadilhas
3	Aprofundando	Conceitos
4	Aprofundando	Evento

5	Aprofundando	Colisões
6	Einstein	EinsteinVoz
7	Einstein	SecEinstein
35	Einstein	Cronologia
8	Experimentos	Demonst_c
9	Experimentos	EfeitoDoppler
10	Experimentos	ExpCrucial
11	Experimentos	LivroEinstein
34	Experimentos	CompRelGeral
12	Historia	CentLorentz
13	Historia	Dialogo_c
14	Historia	Fresnel
15	Historia	BaseConceitual
30	Historia	InfluenciaEinstein
31	Historia	Éter
16	Paradoxo	BuracoEsfera
17	Paradoxo	Gêmeos
18	Paradoxo	Simulação
33	Paradoxo	Gemeos2
19	Simetria	Invariância
20	Simetria	LivroEinstein
21	SocialFilosofico	1 e 2
22	Teoria	Criticas
23	Teoria	BuracoNegro1
24	Teoria	BuracoNegro2
25	Teoria	LivroEinstein
26	Teoria	LivroGamow
27	Teoria	LivroIngles
28	Teoria	Relativ_Realid
29	Teoria	Tempo1
32	Teoria	Tempo2
36	Fotos	-----

