

APRESENTAÇÃO

Desde o ano 2000, atuando como professor de Física do Ensino Médio, constatei que, de uma maneira geral, esta disciplina, ao meu ver tão fascinante e presente no dia-a-dia, era tida pelos estudantes como umas das mais difíceis e entediadas.

Refletindo sobre a prática docente, questões como indisciplina, falta de compreensão dos conteúdos por parte dos alunos, entre outras, geravam vários questionamentos: como motivar os alunos para o aprendizado da Física? Que metodologias utilizar para aproximá-los do conhecimento científico? O que significa avaliar? Para que ensinar este ou aquele conteúdo?

Buscando aprimorar as reflexões teóricas sobre práticas didáticas mais adequadas, passei a me dedicar ao ingresso em um curso de Mestrado. No XV Simpósio Nacional de Ensino de Física, ocorrido em Curitiba, 2003, obtive informações sobre alguns programas de pós-graduação e me identifiquei com o Programa de Educação Científica e Tecnológica da UFSC, por reunir as duas áreas: a Educação e o Ensino de Ciências, mais particularmente, de Física.

Procurando um tema para o pré-projeto, analisei os meus três anos de experiência com o ensino da Física. Recordei-me de perguntas constantes dos alunos sobre temas da Física Moderna, como a Relatividade e a Física Quântica. Eles entravam em contato com estes temas através dos meios de comunicação e de divulgação científica, mas nunca em sala de aula, pois o currículo de Física vigente aborda somente a chamada Física Clássica.

Segundo Schwartz (1992), *assim como as sinfonias de Beethoven e os quadros de Monet, a Teoria da Relatividade é um dos marcos culturais mais significativos do Ocidente* (SCHWARTZ, 1992, p. 19). Questões como *É possível viajar no tempo? O que é a quarta dimensão? Quem foi Einstein e qual sua contribuição para a Física? A*

equação da bomba atômica é $E = mc^2$? apreendem o encanto dos estudantes em relação à ciência do século XX e me motivaram a trazer a discussão de fundamentos da Teoria da Relatividade para as minhas aulas. Mas como? Em que momento? Com que profundidade?

Entre tantas dúvidas, trabalhando com a Física no primeiro ano do Ensino Médio, pude identificar um erro de abordagem logo no início. A maioria dos livros didáticos inicia pelo tratamento da Cinemática Clássica, partindo da definição de seus conceitos básicos.

Habitualmente, destina-se uma aula introdutória para os conceitos de trajetória, ponto material, referencial, espaço, distância, deslocamento, tempo e implementa-se, então, o tratamento matemático envolvendo o cálculo de velocidade média e a aplicação das equações dos movimentos, bem como suas representações gráficas. Esta patente disparidade entre o tempo destinado às questões de ordem conceitual e o dedicado à abordagem matemática, além de contribuir para um distanciamento das discussões teóricas mais importantes, tem suprimido o interesse dos estudantes pela Física.

Tradicionalmente, a necessidade da determinação de um referencial para a descrição dos movimentos é rapidamente abordada nas aulas introdutórias do primeiro ano do Ensino Médio. Entretanto, essa discussão não é retomada na seqüência, como evidenciado na observação contida em um dos livros-texto mais utilizados neste nível:

Quase sempre nossos estudos de movimentos são feitos supondo o referencial na Terra (o observador parado na superfície da Terra). Toda vez que estivermos usando outro referencial, isto será dito explicitamente (MÁXIMO e ALVARENGA, 2000, p. 46).

Dessa forma, os alunos não se dão conta da importância do conceito de referencial e das diferentes possibilidades de descrição do movimento por diferentes observadores, o que, certamente, configura um obstáculo para o entendimento dos pressupostos da Teoria da Relatividade.

Outro conceito da cinemática que não o tem o devido tratamento nas aulas de Física é o tempo, conforme aponta Martins (2004). A ausência de uma discussão mais detalhada sobre o mesmo também é facilmente constatada nos livros didáticos. Alguns não apresentam explicitamente o conceito de tempo (Máximo e Alvarenga, 2000; Gonçalves Filho e Toscano, 2002), enquanto outros destacam que o mesmo não tem definição: *Tempo é uma noção primitiva e fundamental na descrição de qualquer movimento* (RAMALHO JR *et al.*, 1993, p.21) ou *Estamos admitindo intervalo de tempo como noção intuitiva – que dispensa definição – obtida pela diferença entre dois instantes determinados* (GASPAR, 2000, p. 40). Assim, o movimento é descrito como uma variação da posição ao longo do tempo e, sem nenhuma reflexão sobre seus aspectos, ele passa a ser utilizado como parâmetro para as equações da cinemática. Essa prática contribui para referendar, na melhor das hipóteses, a noção de tempo absoluto (quando a Dinâmica é adequadamente trabalhada), o que também figura como um obstáculo para a compreensão da interpretação relativística do mesmo. Dessa forma, distingi esses dois conceitos como possíveis *portas de entrada* para tratar tópicos da Relatividade Restrita a partir da Mecânica, logo no primeiro ano do Ensino Médio.

Acredito que os princípios teóricos e as principais conseqüências da Teoria da Relatividade devam fazer parte do currículo formal de Física no Ensino Médio, não apenas como curiosidade ou apêndice, mas como forma de mostrar o caráter desafiador e interessante da ciência aos estudantes, aproximando-os das fronteiras dessa área de conhecimento.

Meses após a entrega do pré-projeto, tomei conhecimento de que o ano de 2005 foi escolhido como Ano Mundial da Física, em virtude da comemoração do centenário da publicação dos principais artigos de Einstein, dentre eles, o intitulado “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”, no qual o autor enuncia os princípios da

Teoria da Relatividade Restrita. Essa foi uma motivação adicional para o desenvolvimento de nossa pesquisa.

A falta de plausibilidade desta teoria, evidenciada no postulado da constância da velocidade da luz e na necessidade do abandono de noções intuitivas como as de tempo e espaço absolutos, fundamentou uma reflexão sobre as estratégias mais pertinentes para a sua abordagem neste nível de ensino, bem como as maneiras de se constatar a evolução conceitual dos estudantes promovida por essa inserção. Assim, seguindo esse objetivo, estruturei uma seqüência didática para trabalhar tópicos da Relatividade Restrita, especialmente a noção de tempo relativístico, com estudantes do primeiro ano do Ensino Médio, e analisei sua eficácia.

Essa dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro, apresento uma breve contextualização dos principais problemas do ensino de Física nas escolas brasileiras de nível médio e a proposta de inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea para o mesmo. Exponho algumas justificativas para a inserção da Teoria da Relatividade e pontuo os objetivos específicos deste trabalho.

A fundamentação teórica para a construção da proposta é descrita no segundo capítulo. Os pressupostos do construtivismo piagetiano, o modelo de mudança conceitual (Posner *et al.*, 1982), o conceito de perfil conceitual (Mortimer, 1994), a abordagem sócio-interacionista de Vygotsky e os momentos pedagógicos (Delizoicov e Angotti, 1991) são detalhados, por serem fundamentais para a análise e elaboração da intervenção. Um breve histórico do surgimento da relatividade, enfatizando os aspectos abordados em sala, também é apresentado no mesmo. Através de uma revisão na literatura específica, analiso, na última seção, propostas encontradas na literatura corrente.

No capítulo 3, a opção metodológica desta pesquisa é apresentada e descrevo a aplicação e os resultados da seqüência didática em um estudo piloto, a análise desses resultados, sua relevância à reestruturação da seqüência para uma nova aplicação. Os resultados desta segunda intervenção, denominada estudo final, são comentados e analisados no capítulo seguinte, sendo as conclusões e perspectivas futuras delineadas no último.

1. A TEORIA DA RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO

1.1 Atualização do Ensino de Física

A forma como a Física vem sendo ensinada, na grande maioria das escolas brasileiras de Ensino Médio, tem sido alvo de muitas críticas. A ênfase na memorização e aplicação direta de fórmulas, bem como a descontextualização do desenvolvimento desta ciência, têm contribuído fortemente para distanciá-la da preferência dos estudantes e torná-la quase um mito. Depoimentos como *Eu odeio Física* são muito comuns entre os alunos desta faixa etária. Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) apontam essa situação

O ensino de Física tem sido realizado freqüentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazio de significados. Privilegia a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual de abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos (PCNEM, 1999, p.229).

Além da metodologia de ensino, a seleção dos conteúdos também tem sido criticada em virtude da grande ênfase dada à Física Clássica, principalmente a desenvolvida entre 1600 e 1850. A seqüência dos conteúdos tratados no Ensino Médio tende a seguir os clássicos manuais didáticos. Inicia-se tradicionalmente pela Mecânica, abordada no primeiro ano, deixando a Física Térmica, a Óptica e a Ondulatória para o segundo e a Eletricidade e o Magnetismo para serem estudados no terceiro e último ano deste ciclo. Essa escolha exclui tanto os primórdios da ciência (a partir da Grécia antiga), como as grandes mudanças no pensamento científico, ocorridas no início do século XX (TERRAZZAN, 1992), além de apresentar a Física como blocos estanques e independentes entre si.

Dessa forma, a maneira como a Física Clássica vem sendo ensinada tem contribuído, em geral, para gerar nos educandos a falsa idéia de que as teorias científicas são constituídas de verdades absolutas e imutáveis, provenientes da mente de alguns gênios infalíveis (PCNEM, 1999). A grande maioria dos livros didáticos disponíveis para os alunos do Ensino Médio está imbuída dessa noção:

Salvo raríssimas exceções, os livros didáticos de física são extremamente semelhantes em termos de estrutura, de seqüência, de forma de apresentação dos conteúdos e até de tipos de exercícios resolvidos e propostos. Por isso, acompanhando-se a forma de desenvolvimento dos conteúdos nesses livros, tem-se uma boa aproximação do que ocorre em média nas aulas de física nas escolas (TERRAZZAN, 1994, p.108).

Moreira também aponta que,

Por falar em livros, é claro que eles sempre existiram e cabe destacar, entre os atuais, pela ótima qualidade, o *Curso de Física*, de Alvarenga e Máximo (1997) e o *Física* do GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física, 1993). [...] muito do ensino de Física em nossas escolas secundárias está, atualmente, outra vez referenciado por livros, porém de má qualidade – com muitas cores, figuras e fórmulas – e distorcido pelos programas de vestibular; ensina-se o que cai no vestibular e adota-se o livro com menos texto para ler (MOREIRA, 2000, p.95).

Portanto, faz-se necessário propor alternativas para melhorar esse quadro, mostrando aos educandos que a Física é uma ciência que está em constante transformação, além de aproximá-los do desenvolvimento desta ciência, destacando-a como uma construção da mente humana (ARONS, 1997). A atualização dos PCNEM preconiza mudanças nessa direção:

Ao mesmo tempo, a Física deve vir a ser reconhecida como um processo, cuja construção ocorreu ao longo da história da humanidade, impregnado de contribuições culturais, econômicas e sociais, que vem resultando no desenvolvimento de diferentes tecnologias e, por sua vez, por elas sendo impulsionado (PCNEM+, 2002, p 59).

Por acreditarmos que a ciência é dinâmica, pensamos que os currículos escolares também precisam ser atualizados continuamente, para atenderem aos avanços obtidos pela mesma. Muito tem se discutido sobre a necessidade de uma reformulação no currículo de Física do Ensino Médio, a fim de acrescentar os avanços obtidos pela ciência do século XX. Diversos autores brasileiros (OSTERMANN, 1999; ARRUDA e VILLANI, 1998, TERRAZAN, 1994, dentre eles) abordam estas questões e propõem uma reestruturação curricular visando à inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea. Apenas para esclarecer a terminologia utilizada doravante, estamos adotando a divisão cronológica da Física em três períodos, de acordo com Rezende JR (2001):

1. CLÁSSICO, que compreende o período que vai desde o estabelecimento da Mecânica Newtoniana até o desenvolvimento do Eletromagnetismo Clássico de Maxwell, no final do século XIX.

2. MODERNO, que se estabeleceu entre o final do século XIX até a década de 40 do século XX (início da Segunda Guerra Mundial).

3. CONTEMPORÂNEO, após o início da Segunda Guerra Mundial (aproximadamente na década de 40), até os dias de hoje.

Tópicos como hidrostática, hidrodinâmica e acústica, reformulados à luz do paradigma newtoniano e das formulações devido a Euler, Lagrange e Hamilton, são englobados na divisão Física Clássica. Outros, como a teoria cinética dos gases, teorias da matéria, termodinâmica e a mecânica estatística clássica, são considerados na mesma divisão em função da concomitância cronológica. Neste sentido, a Física abordada no Ensino Médio não engloba nem a totalidade dos conteúdos da Física Clássica.

Dentre as razões apontadas para a reformulação curricular pretendida, Terrazzan defende que

[...] conteúdos de Física Moderna e Contemporânea correspondem a uma necessidade vital de nossos currículos de Física escolar. A própria importância dos temas de Física Moderna e Contemporânea na constituição da Física, enquanto área do conhecimento científico, exige sua inclusão nos currículos escolares (TERRAZZAN, 1994, p.34).

Ainda, segundo Ostermann,

Estudar problemas conceituais existentes na Física Moderna e Contemporânea envolve os estudantes nos desafios filosóficos de alguns aspectos da Física. O fato de que nem tudo, no mundo científico, é sabido ou entendido, modifica a idéia que os estudantes em geral têm de Física – um assunto que é uma “massa” de conhecimentos e fatos, um livro fechado. Ou são mostrados aos alunos os desafios a serem enfrentados pela Física no futuro, ou eles não serão encorajados a seguirem carreiras científicas (OSTERMANN, 1999, p 12).

No mesmo trabalho, a autora menciona a Conferência Interamericana sobre Educação em Física, na qual foi organizado um grupo de trabalho para discutir o ensino de Física Moderna. Na discussão, foram levantadas inúmeras razões para a introdução de tópicos contemporâneos no Ensino Médio. Dentre elas:

- despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próxima a eles;
- os estudantes não têm contato com o excitante mundo da pesquisa atual em Física, pois não vêem nenhuma Física além de 1900. Esta situação é inaceitável, em um século no qual as idéias revolucionárias mudaram a ciência totalmente;
- é do maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física;
- Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata, mas resultados de pesquisa em ensino de Física têm mostrado que, além de Física Clássica ser

também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreendê-la (BAROJAS, *apud* OSTERMANN, 1999, p. 9).

Apesar de concordarmos que a abordagem de Física Moderna no Ensino Médio seja capaz de despertar vocações e incentivar aos jovens a seguirem carreiras científicas, como defende Ostermann, pensamos que este não deva ser o objetivo principal da inserção de temas modernos neste nível de ensino, devido ao caráter terminal evocado ao mesmo na atual Lei de Diretrizes e Bases. Distinguindo-se de um ensino voltado predominantemente para *formar* cientistas, hoje é imperativo ter como pressuposto a meta de uma *ciência para todos* (DELIZOICOV *et. al.* , 2002). Dessa forma, devemos pensar em um ensino de Física cuja perspectiva seja possibilitar que nossos estudantes tenham contato com uma outra forma de cultura: a cultura científica. Mortimer (1994) justifica a inserção de conceitos da Física Moderna associando-a a um processo de ampliação da cultura do educando,

Aprender ciências está muito mais relacionado a se entrar em um mundo que é ontologicamente e epistemologicamente diferente do mundo cotidiano. Esse processo de enculturação¹ pode ocorrer, também, quando se tem que aprender teorias mais avançadas. Aprender mecânica quântica para quem tem uma visão clássica do mundo tem essa mesma característica de enculturação (MORTIMER, 1994, p 31).

Os estudos de Zanetic (1989) foram pioneiros, na busca por uma relação mais próxima entre o conhecimento científico, particularmente a Física, e a manifestação cultural. Em sua tese de doutorado, o autor defende a necessidade de considerar a Física, além de todos os seus aspectos formativos e instrumentais, como parte integrante do *caldo cultural* da cidadania:

¹ O significado da palavra “enculturação”, derivada do neologismo inglês *enculturation*, é atribuído ao processo pelo qual uma pessoa entra numa cultura diferente da sua, adquirindo conceitos, linguagem e certas práticas da cultura científica (MORTIMER, 1994, p.2).

[...] o conhecimento científico é um produto da vida social e como tal leva a marca da cultura da época, da qual é parte integrante, influenciando e sendo influenciado por outros ramos do conhecimento, sendo o relacionamento da física com a filosofia um dos melhores exemplos (ZANETIC, 1989, p 23).

Especificamente em relação à necessidade de inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, Zanetic recomenda:

Ofereça aos alunos uma visão da física que aproxime a “física escolar” dos mais recentes avanços construídos pelos físicos contemporâneos. Isto significa que o conteúdo da Física a ser trabalhada no segundo grau não pode ficar restrito apenas à física conhecida até fins do século XIX, sob pena de dar uma impressão totalmente falsa e incompleta da perspectiva de mundo oferecida atualmente. Isto porque no final do século passado e início deste a física conheceu um desenvolvimento de tal monta que toda a concepção de mundo que se tinha teve de ser repensada [...] Muitos fenômenos só têm uma explicação razoável quando apelamos para essas duas teorias² do século XX, totalmente ausentes nas aulas do segundo grau (ZANETIC, 1989, p. 23).

Entre tantas justificativas, podemos dizer que já não há mais dúvida sobre a necessidade de uma mudança no currículo de Física do Ensino Médio a fim de acrescentar temas de Física Moderna e Contemporânea. Entretanto, apesar de ser praticamente um consenso dentro da academia, a realidade das salas de aula é bem diferente. Em virtude de inúmeros problemas, como a precariedade das condições de trabalho do professor, a falta de uma formação específica ou a ênfase dada aos programas de vestibular que, em geral, não cobram temas modernos, podemos afirmar que a Física Moderna ainda está muito distante dos alunos do Ensino Médio.

Dessa forma, acreditamos que, para contribuir de uma maneira mais significativa para a atualização do currículo de Física, devemos transcender o campo das justificativas e direcionar nossos esforços para questões de ordem prática. Alguns questionamentos devem ser levantados para nortear a pesquisa nessa área (OSTERMANN e MOREIRA, 2001): Quais tópicos devem ser ensinados? Em que

² As duas teorias referidas são a Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica.

nível de profundidade devemos trabalhar? Quais metodologias adotar para alcançar uma aprendizagem significativa? A introdução dos conceitos de Física Moderna e Contemporânea deve ser ao final do curso (após o Eletromagnetismo) como discussão dos limites da Física Clássica ou articulada com os conteúdos clássicos numa reestruturação completa? Quais tópicos da Física Clássica, como o excesso da cinemática e de circuitos elétricos, podem ser menos enfatizados disponibilizando o tempo necessário para as inclusões? Que materiais didáticos devem ser produzidos?

Certamente, não é possível responder exaustivamente a nenhuma destas questões em um único trabalho. Sobre uma das questões levantadas anteriormente, Terrazzan defende que

Do ponto de vista estrutural, a temática de Física Moderna e Contemporânea deve estar organicamente incorporada à apresentação e ao desenvolvimento das teorias clássicas. Assim, possibilita-se aos alunos perceberem a física como um ‘corpo unitário’ de conhecimentos, com ramificações internas que desenvolveram muitas vezes de forma autônoma, ora aglutinando-se, ora incorporando-se umas às outras, enfim, formando os grandes sistemas conceituais que hoje se estabeleceram (TERRAZZAN, 1994, p.71).

A proposição de Terrazzan é coerente com a posição de Arons (1990), o qual sustenta restringir a listagem de tópicos passíveis de discussão na escola média, e excluir parte dos temas usualmente trabalhados na física escolar (ARONS, 1990). Atenta ainda para a unidade necessária nessas inserções, preconizando a necessidade de critérios claros, explícitos e conscientes, de modo a priorizar o processo da produção científica, a sua evolução histórica, em detrimento dos produtos, os seus resultados finais (TERRAZZAN, 1994).

Nesse sentido, os livros-texto têm sido produzidos na contramão desta análise. Cavalcante (1999) aponta os esforços despendidos por autores de livros didáticos para inserir assuntos relativos à Física do século XX nesses materiais. Destaca que, na maioria dos casos, esses temas são apresentados no final do terceiro volume das obras, o

que acaba fazendo com que estes não sejam sequer cogitados nos planos de ensino, muito menos na sala de aula. Cabe ressaltar as exceções, como os livros de Alvarenga e Máximo e do GREF, que realizam essa inserção de modo diferenciado, sendo que, no primeiro, é feita em tópicos suplementares ao final de determinados capítulos e no segundo, concomitantemente e de forma complementar à teoria clássica. Porém, tratar a Física Moderna por meio de temas complementares implica amenizar sua importância para os estudantes. Rezende Jr (2001) faz uma análise dos principais livros didáticos de Física do Ensino Médio, quanto à presença de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea, e constata que esses temas, quando abordados, ainda são vistos como secundários:

Podemos notar que a maioria dos livros que trazem elementos de Física Moderna e Contemporânea tem esses conteúdos separados em seções especiais, em apêndices ou pequenas inserções informativas no decorrer dos capítulos. O fato de esses conteúdos aparecerem como um tópico complementar acaba caracterizando-os diferentemente do restante do conteúdo, primeiramente pelo fato de ser uma leitura complementar e, com isso, não ser avaliado pelo professor; por ter uma linguagem informativa e não estar disposto na sequência tradicional; não conter exercícios operacionais, desvinculando-se do ferramental matemático (REZENDE JR, 2001, p. 57).

Diante dos problemas enfrentados para a inserção de Física Moderna e Contemporânea, Resnick (1987) propõe que a mesma deve estar fundamentada em três pilares:

1. *Overview* – Análise prévia da relevância do ensino de determinados conceitos para promover uma redução da quantidade de conteúdos clássicos abordados, assim como de detalhamentos matemáticos exaustivos e da repetição de exercícios-padrão.

2. *Sprinkle* – Pulverização dos temas modernos tratados paralelamente à concepção clássica de determinados conceitos.

3. *Broaden* – Ampliar as fontes dos estudantes para que os mesmos não se restrinjam ao aprendizado dentro do ambiente de sala de aula. Indicar livros e artigos sobre temas modernos e incentivar atividades extracurriculares como clubes de ciência (RESNICK, 1987).

Assim, como uma forma de contribuir para a inserção de temas modernos no currículo de Física em nível médio, focalizamos nossa pesquisa na elaboração e teste de uma proposta para abordar alguns conceitos da Teoria da Relatividade Restrita no primeiro ano do Ensino Médio, de acordo com o segundo pilar proposto por Resnick e com as ressalvas enfatizadas por Terrazzan e Arons. Acreditamos que certos conceitos da Relatividade podem ser abordados logo no primeiro ano, justamente por questionarem várias definições tradicionalmente abordadas nesta etapa do ensino.

Partindo de um levantamento dos tópicos habitualmente tratados no primeiro ano (*overview*), selecionamos a noção de tempo relativístico que, para sua inserção, requer a elucidação dos dois postulados da teoria da relatividade restrita. Edificamos uma seqüência didática para abordá-los em sala de aula. Dessa forma, nosso problema de pesquisa constituiu-se na busca por estratégias de ensino que visassem a uma aprendizagem significativa desse conceito, associado aos de espaço e velocidade, e no estudo da evolução conceitual dos estudantes decorrente desta abordagem.

Formulamos e aplicamos um questionário inicial (pré-teste), com o intuito de levantar as concepções dos alunos acerca dos conceitos a serem trabalhados e de direcionar a escolha dos procedimentos metodológicos da intervenção. A gravação das aulas em vídeo possibilitou-nos o registro e o acompanhamento do processo. A análise de episódios de ensino, recortados dessas gravações, evidenciou os conflitos dos estudantes em relação às idéias contra-intuitivas da relatividade. A aplicação de um outro questionário (pós-teste), contemplando situações-problema nas quais os

estudantes deveriam fazer uso de explicações relativísticas para resolvê-las, e questões de natureza metacognitiva, procurando evidenciar a consciência dos sujeitos ante ao processo vivenciado, constituem, juntamente com os episódios analisados, a matéria-prima dessa investigação.

Na próxima seção, relatamos justificativas para o ensino da Teoria da Relatividade presentes na literatura específica e complementamos com nossos argumentos a favor desta inserção.

1.2 Por que Relatividade no Ensino Médio?

Apesar de considerarmos essencial a reformulação do currículo de Física em nível médio, acreditamos que a escolha dos temas a serem abordados é de grande importância. O ensino de Física para a escola média não tem como fim principal a formação de cientistas e de futuros pesquisadores, mas sim, dar condições ao estudante para compreender melhor a sua realidade e participar ativamente das transformações de sua sociedade, isto é, ser capaz de exercer sua cidadania (CAVALCANTE, 1999).

Citando mais uma vez a atualização dos PCNEM:

A presença do conhecimento de Física na escola média ganhou um novo sentido a partir das diretrizes apresentadas nos PCNEM. Trata-se de construir uma visão da Física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. Nesse sentido, mesmo os jovens que, após a conclusão do ensino médio, não venham a ter mais qualquer contato escolar com o conhecimento em Física, em outras instâncias profissionais ou universitárias, ainda terão adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem (PCNEM+, 2002, p. 59).

Nessa perspectiva, faz-se necessária uma análise cuidadosa de quais conteúdos de Física Moderna e Contemporânea poderiam ser inseridos no Ensino Médio. Essa inserção não pode ser justificada simplesmente pela necessidade de uma atualização curricular, mas sim, legitimada através de uma apreciação da relação custo-benefício

engendrada pela inclusão deste ou daquele tópico em um dado momento do planejamento (*overview*).

Com o intuito de fazer um levantamento sobre quais conteúdos seriam mais relevantes e, portanto, deveriam integrar o currículo do Ensino Médio, Ostermann (1999) realizou um estudo com vinte e dois professores de Física, vinte e dois pesquisadores em Ensino de Física e cinquenta e quatro físicos, através de uma técnica de pesquisa denominada Delphi³. Os participantes da pesquisa responderam a três questionários, sendo que no primeiro solicitou-se, através de uma pergunta aberta, quais seriam os tópicos de Física Moderna e Contemporânea que deveriam ser ensinados na escola média. Num total de vinte temas, o mais sugerido foi a Mecânica Quântica (63%), seguida da Relatividade (50%). Em uma outra etapa, partindo dos temas listados no primeiro momento, os participantes foram questionados sobre a importância de ensinar os diversos tópicos: 61,8% concordam que relatividade restrita deva ser ensinada, 18,4% não opinaram e 19,8% discordam. Em um terceiro questionário, os entrevistados tiveram a oportunidade de rever suas opiniões, contrastando-as com os resultados apresentados nas etapas anteriores. Essa pesquisa mostra que a comunidade científica espera que os temas em foco façam parte do currículo de Física do Ensino Médio; mostra também que a Teoria da Relatividade Restrita, em particular, aparece com uma das áreas mais importantes a serem abordadas.

Borghi, De Ambrosis e Ghisolfi (1993) acreditam que conceitos da relatividade devam fazer parte do Ensino Médio pelas seguintes razões:

- valor cultural desta teoria;
- possibilidade de lidar com seus conceitos básicos sem a necessidade de um tratamento matemático sofisticado;

³ Esta técnica pode ser caracterizada como um método para estruturar um processo de comunicação grupal a fim de que seja efetivo em permitir que um grupo de indivíduos, como um todo, enfrente um problema complexo (LINSTONE e TUROFF *apud* OSTERMANN, 1999, p. 41).

- promover um intenso envolvimento dos estudantes;
- reconhecimento dos processos que envolvem a passagem de uma teoria científica para outra;
- importância de constatar como uma teoria física pode estar desvinculada do senso comum e de experiências cotidianas.

Para Villani e Arruda (1998), a inserção da Relatividade Especial no Ensino Médio não deve ter como objetivo provocar uma mudança conceitual nos estudantes, no sentido de fazer com que os mesmos alterem sistematicamente sua maneira de analisar fenômenos físicos. Com esta inserção, os autores esperam que

os alunos percebam a existência e os aspectos essenciais de uma mudança conceitual na história da ciência para que os mesmos compreendam que esta mudança permitiu avanços na tecnologia moderna [...] e que uma grande importância seja dada às discussões das diferenças entre as idéias clássicas, de um lado, e as modernas provenientes da relatividade, do outro (VILLANI e ARRUDA, 1998, p. 94).

Rodrigues (2001) aponta que a justificativa para essa inserção não permeia o apelo para a compreensão de avanços tecnológicos presentes em nossa sociedade, como no caso da Física Quântica. O autor elenca três principais objetivos:

1. 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;
2. a possibilidade de essa teoria servir de porta de entrada para outros tópicos da Física Moderna e Contemporânea;
3. a necessidade de abordagem de um tema tão presente na sociedade através da divulgação científica (RODRIGUES, 2001, p. 22).

Esse autor enfatiza, particularmente, o terceiro item, defendendo que devido ao fato de o ícone Einstein estar freqüentemente presente na mídia, no *marketing* e nos artigos de divulgação, existe um interesse natural despertado nos alunos. Moreira e Studart (2005) apontam que o misticismo em torno do carismático cientista deve-se, em parte, a sua atuação pessoal na popularização de suas idéias por meio de seus ensaios, artigos de revisão e palestras de divulgação científica. Em outra parte, deve-se à

contestação, de comentários a críticas, à complexidade dos conceitos físicos, filosóficos e matemáticos de suas obras (MOREIRA e STUDART, 2005).

Uma justificativa interessante para a inserção da Teoria da Relatividade Restrita é que, através dela, o aluno poderá ter uma visão mais abrangente do dinamismo da ciência. Köhnlein e Peduzzi (2005) aplicaram um módulo didático em uma turma de segundo ano do Ensino Médio, tendo essa teoria como pano de fundo para discutir com os alunos a natureza da ciência e as características do fazer científico. Em uma primeira etapa, foi aplicado um questionário que constatou que as idéias dos alunos estavam inspiradas na visão empirista-indutivista. Segundo os autores, após as atividades desenvolvidas, as respostas dos alunos ao instrumento apresentaram, de forma geral, uma diferença considerável. Especificamente sobre o uso da Relatividade Restrita como conteúdo norteador da discussão, os mesmos justificam sua inserção no nível médio:

Esta proposta sugere igualmente que introduzir a Teoria da Relatividade Restrita no Ensino Médio pode ser uma alternativa para quem deseja ir além do mero algoritmo e de alguns experimentos, ou seja, para quem busca tornar a Física mais interessante para o aluno. Cabe ressaltar a importância e a riqueza do tema para explorar períodos de crises e revoluções científicas, para discutir o papel da comunidade científica na construção das teorias e para mostrar que o conhecimento científico não é imutável, e sim uma construção humana que está sujeita a contestações e modificações (KÖHNLEIN e PEDUZZI, 2005, p. 64).

Conforme mencionado anteriormente, a inserção da relatividade restrita no Ensino Médio não pode ser diretamente justificada com base na sua associação com os principais avanços tecnológicos ocorridos no século XX. Os efeitos da dilatação temporal e da contração das distâncias, por exemplo, podem ser seguramente desprezados no cotidiano. Entretanto, justamente por transcender a realidade sensorial imediata, acreditamos que a relatividade possa contribuir para ampliar a visão de mundo dos estudantes. Nesse sentido, concordamos com Moreira ao afirmar:

[...] é um erro ensinar Física sob um único enfoque, por mais atraente e moderno que seja. Por exemplo, ensinar Física somente sob a ótica da Física do cotidiano é uma distorção porque, em boa medida, aprender Física é, justamente, libertar-se do dia-a-dia (MOREIRA, 2000, p. 95).

Helm e Gilbert (1985) defendem que as experiências de pensamento, ou *Gedankenexperimente*, têm desempenhado um importante papel na história da Física e que por incentivarem a imaginação, são essenciais para o ensino de Física. Especificamente para o caso da relatividade, estas são fundamentais para a base da teoria, devido à impossibilidade de realizar experiências com velocidades próximas à da luz. Einstein propôs uma série de experiências pensadas, dentre elas, trens se deslocando em altas velocidades, definição de simultaneidade baseada na emissão/recepção de raios de luz, perseguição de um raio de luz. Portanto, visando a um ensino que seja capaz de promover uma ampliação da capacidade de abstração dos estudantes do Ensino Médio, a relevância da abordagem dos conceitos essenciais da teoria da relatividade é evidente.

A preocupação com o ensino da Teoria da Relatividade Restrita também está presente no ensino superior. Diversos autores já relataram dificuldades enfrentadas ao tratar o tema. Arruda (1994) discute a questão da plausibilidade da teoria, especificamente do postulado da constância da velocidade da luz, para os alunos. A aceitação de algumas idéias centrais da teoria se dá devido à autoridade dos livros, dos professores ou mesmo da comunidade física, e não porque as mesmas são significativas para os estudantes. Nas palavras do autor:

[...] podemos dizer que a teoria como um todo (postulados e principais conseqüências) não é inicialmente plausível devido principalmente às suas características contra-intuitivas, ou seja, por divergir da visão do senso comum, não encontrando suporte na ecologia conceitual do aluno. Isso pode ocorrer devido ao comprometimento do aluno com as noções absolutas de espaço e tempo ou, no caso dos paradoxos (dilatação/contração), à compreensão insuficiente dos mesmos, considerados às vezes como tendo realidade apenas aparente (ARRUDA, 1994, p. 18).

Pietrocola e Zylbertszajn (1999) constataram deficiências semelhantes no que diz respeito à compreensão da Teoria da Relatividade Restrita. Com o objetivo de verificar a utilização do Princípio de Relatividade por alunos de um curso de graduação em Física, os autores propuseram diversas situações idealizadas. Os estudantes deveriam se imaginar no interior de um trem que andava ora rápida, ora lentamente, e responder sobre as eventuais mudanças no comportamento dos fenômenos em virtude do movimento do trem. As situações propostas envolviam dinâmica dos corpos, hidrostática, termologia, eletricidade, magnetismo, óptica e som. Segundo os autores,

[...] o resultado que mais surpreendeu nessa pesquisa foi a ausência de menção explícita ao Princípio de Relatividade nas respostas. Não foi possível detectar em nenhuma delas argumentos relativísticos que explicassem a inexistência de mudanças nos fenômenos apresentados (PIETROCOLA e ZYLBERTSZTAJN, 1999, p. 274).

Ainda na mesma pesquisa, algumas respostas mostraram que certos alunos utilizaram conceitos relativísticos como dilatação do tempo, contração do comprimento e aumento de massa inercial de forma bastante equivocada.

Esses alunos demonstraram ter um conhecimento superficial da teoria, e ao incorporarem alguns conceitos da mesma à sua estrutura interpretativa chegaram a conclusões contrárias daquelas previstas pela Teoria da Relatividade (PIETROCOLA e ZYLBERTSZTAJN, 1999, p. 272).

Estudos desenvolvidos por Santos (1986) e Villani e Pacca (1990) constatam que os alunos acreditam haver um *tempo real* e *tempos aparentes*, evidenciando assim, a crença na existência de um referencial privilegiado para a marcação do tempo. Na reinterpretação dos conceitos de tempo e espaço, concordamos com Rodrigues, quando o mesmo assegura que

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 (RODRIGUES, 2001, p. 21).

Experiências, como as descritas anteriormente, mostram que ainda existe um campo vasto a ser explorado. Acreditamos que, ao incorporar conceitos, conseqüências e interpretações da Teoria da Relatividade no currículo de Física do Ensino Médio, podemos contribuir para uma ampliação da percepção de mundo dos estudantes, mostrando que a Física Moderna trata de fenômenos que, muitas vezes, fogem da nossa experiência imediata e também para desmistificar esta ciência, caracterizando-a como construída historicamente por seres humanos. Além disso, pensamos que essa inserção contribua para melhorar a assimilação e compreensão da Teoria da Relatividade para os futuros graduandos em ciências exatas.

No próximo capítulo, delineamos a fundamentação teórica para a concepção de nossa seqüência didática apresentando nossa concepção sobre o processo de ensino-aprendizagem, fundamentando histórica e epistemologicamente o surgimento da Teoria da Relatividade e sintetizando algumas propostas para o ensino da mesma, presentes na literatura específica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA A ELABORAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

2.1 Construtivismo, Mudança Conceitual e Perfil Conceitual

Vários pesquisadores e educadores têm direcionado seus esforços na tentativa de identificar as complexas variáveis que envolvem a aprendizagem dos conceitos científicos. Está bem estabelecido que as estratégias de ensino devam levar em conta o que os alunos pensam e que *ensinar não é transmitir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou sua construção* (FREIRE, 1996).

No intuito de implementar essas estratégias, é imperativo considerar como o conhecimento é construído pelo indivíduo. Os estudos de Jean Piaget foram pioneiros nessa área. Partindo de uma analogia com o processo de adaptação dos organismos biológicos ao meio ambiente, Piaget defende que o desenvolvimento intelectual se dá através de um processo de adaptação da estrutura cognitiva do indivíduo aos novos fenômenos e conceitos, com os quais o mesmo tem contato ao longo de seu desenvolvimento. Esta adaptação é, então, realizada sob duas operações: assimilação e acomodação.

A assimilação é o processo cognitivo pelo qual um indivíduo incorpora um novo dado às suas estruturas cognitivas prévias (LIMA, 1998). Assim, quando a criança vivencia novas experiências, tenta adaptar esses novos estímulos às estruturas cognitivas que já possui. Piaget define a assimilação como:

[...] uma integração à estruturas prévias, que podem permanecer invariáveis ou são mais ou menos modificadas por esta própria integração, mas sem descontinuidade com o estado precedente, isto é, sem serem destruídas (PIAGET, 1996, p. 13).

Por outro lado, a nova informação pode não ser adaptável à estrutura existente, e sua integração leva, neste caso, a um rearranjo na estrutura cognitiva. Piaget define esse processo por acomodação

Chamaremos acomodação (por analogia com o *acomodatos* biológico) toda modificação dos esquemas de assimilação sob a influência de situações exteriores (meio) aos quais se aplicam (PIAGET, 1996, p. 13).

Estes dois processos estão intimamente relacionados. Enquanto a assimilação é sempre feita a partir da adaptação a esquemas acomodados anteriormente, sedimentados nos constructos cognitivos do sujeito, a acomodação se dá contra esses esquemas, pela assimilação da informação nova que os perturba. A nova estrutura é vista como superior à antiga, promovendo o progresso da construção do conhecimento. No momento em que um fato novo provoca uma perturbação, três tipos de comportamento são desencadeados: alfa, beta e gama.

O primeiro deles constitui a conduta inicial frente à perturbação, consistindo na tentativa de neutralização da mesma, negligenciando-a ou afastando-a. Entretanto, o equilíbrio resultante desse comportamento é instável. O comportamento beta inicia-se pelo reconhecimento da perturbação como tal, implicando na busca por alterações no esquema prévio pela formulação de explicações específicas. Assim, o elemento perturbador passa a incorporar uma nova estrutura reorganizada. A reestruturação iniciada em beta é consolidada no comportamento gama, à medida que esta nova estrutura é utilizada para fazer previsões e interpretar outros fenômenos. O equilíbrio é restabelecido e o que anteriormente era visto como uma perturbação passa a ser parte integrante do esquema atual.

Na primeira fase, a alfa, o indivíduo prefere negar a perturbação, ou seja, procura argumentos incipientes para o seu acontecimento, mas não abandona a teoria anterior. Na fase seguinte, percebe que não é mais possível ignorar a perturbação e

passa a criar novas estruturas de raciocínio para explicá-la. Quando a nova teoria é utilizada para prever e antecipar possíveis variações, a reorganização está completa (fase gama), dispondo a reequilibração da estrutura cognitiva.

Apesar de objetivar o alcance das fases beta e gama, algumas vezes uma perturbação suficientemente grande não possibilita ao indivíduo superar a fase alfa, em função da resistência natural à mudança. Deve-se, portanto, considerar um outro tipo de perturbação além da conflitiva, a perturbação lacunar. Esta perturbação ocorre quando o sujeito nota que faltam objetos, condições ou informações para realizar uma ação. Neste caso, a reformulação da teoria se dá por complementações e reforços, não por correções.

É importante ressaltar que a teoria de Piaget é uma teoria de aprendizagem e não de ensino-aprendizagem. Seus esforços foram destinados à análise do processo de evolução do conhecimento do indivíduo a partir da interação do mesmo com o objeto em si e não especificamente pelo processo de ensino. Em outras palavras, essa teoria não se constitui num método de atuação para a sala de aula, mas o seu conhecimento permite repensar a investigação pedagógica e oferecer princípios estruturadores para a intervenção didática.

Posner *et al.* (1982) propõem, no início da década de 80, um modelo de ensino visando incorporar a aprendizagem piagetiana, o denominado Modelo de Mudança Conceitual. Os autores procuraram analogias entre o processo de mudança de uma teoria científica para outra, ao longo da história da ciência, e a forma como as concepções prévias dos estudantes são substituídas pelo conhecimento científico durante o processo educacional (POSNER *et al.*, 1982). Utilizando a mesma terminologia da teoria piagetiana, o processo de mudança conceitual apresenta duas fases: a primeira, denominada assimilação, ocorre quando os alunos utilizam suas idéias prévias para interpretar os novos fenômenos propostos, enquanto a segunda,

denominada acomodação, ocorre quando os mesmos percebem que suas concepções iniciais são insuficientes e inadequadas para interpretar o fenômeno novo, reorganizando ou substituindo seus conceitos centrais (POSNER *et al.*, 1982). Existem quatro condições básicas para que ocorra a acomodação:

- 1 - Insatisfação: os cientistas e os estudantes tendem, provavelmente, a não fazer grandes mudanças em seus conceitos, enquanto estiverem satisfeitos com as suas concepções prévias.
- 2 - Inteligibilidade: o indivíduo precisa compreender a sintaxe, o modo de expressão, o significado, o sentido, os termos e os símbolos utilizados pela nova concepção. O uso de analogias e metáforas pode auxiliar nesse processo.
- 3 - Plausibilidade: os novos conceitos adotados devem, pelo menos, ser capazes de resolver os problemas gerados pela concepção predecessora. Caso contrário, não parecerá uma escolha plausível.
- 4 - Frutificação: a nova teoria deve abrir a possibilidade de que novos conceitos sejam estendidos a outros domínios, revelando novas áreas de questionamento (POSNER *et al.*, 1982, p. 214).

Além dessas quatro condições, este trabalho estabelece que a aprendizagem envolva um elemento adicional. Tendo em vista que o processo de questionamento e aprendizagem ocorre contra a base de fundo dos conceitos correntes do indivíduo, os mesmos não têm a possibilidade de existir isoladamente, mas, tão somente, inseridos numa estrutura conceitual, que lhes dá sustentação (AGUIAR JR, 1998). De maneira particular, naquilo que se refere à reorganização ou mudança conceitual, devem também ser consideradas, nesse processo, as características da ecologia conceitual dos estudantes, a saber:

1. Anomalia: o caráter específico das falhas de uma dada idéia é uma importante parte da ecologia que faz com que se selecione uma nova idéia sucessora.
2. Analogias e Metáforas: servem para sugerir novas idéias e torná-las inteligíveis.
3. Compromissos Epistemológicos: a) Ideais Explanatórios: a maioria dos campos de estudo tem pontos de vista específicos do conteúdo que deve ser considerado como explicação e como padrão de julgamento no campo. b) Visão Geral sobre o Caráter do Conhecimento: alguns padrões que são levados em conta para que um assunto tenha sucesso – a elegância, a economia, a parcimônia, não ser *ad hoc* e parecer neutro.
4. Crenças e conceitos metafísicos: crenças a respeito de um ordenamento, simetria, não aleatoriedade do universo, podem resultar

numa visão epistemológica e podem vir a selecionar ou rejeitar tipos particulares de explicações. Os conceitos científicos apresentam uma qualidade metafísica, isto é, podem fazer acreditar que eles representam a natureza última do universo e, por consequência, seriam imunes às refutações.

5. Outros conhecimentos: conhecimentos em outros campos podem influenciar a escolha de fenômeno para estudo ou, um conceito que compete com um outro, pode vir a ser selecionado em razão de ser mais promissor do que os seus competidores (POSNER *et al.*, 1982, p. 214-215).

Assim, segundo este modelo, as quatro condições anteriores acrescidas da caracterização da ecologia conceitual dos indivíduos tendem a assegurar o sucesso da ocorrência de uma mudança conceitual nos estudantes. Nesse sentido, mudança conceitual virou sinônimo de aprender ciência (MORTIMER, 1996).

Por outro lado, muitos pesquisadores já apontam críticas e desvantagens do mesmo, algumas das quais abordamos na seqüência.

Uma das premissas desta metodologia consiste em, no início de uma aula, ou de uma seqüência didática, gerar um conflito cognitivo para provocar uma perturbação, conflitiva ou lacunar, nas estruturas cognitivas dos estudantes, objetivando desencadear o processo de reequilíbrio. Porém, muitas vezes, esses conflitos não são reconhecidos pelos alunos, uma vez que os mesmos precisariam dominar aspectos da nova teoria para que pudessem identificar essas anomalias e contra-exemplos. Exemplos disso podem ser encontrados na própria história da ciência. De acordo com o epistemólogo Imre Lakatos, uma determinada anomalia só é reconhecida como tal, após uma nova teoria ter sido estabelecida, ou seja, um experimento não é considerado como crucial no momento em que ele ocorre, mas sim, retrospectivamente. O resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, por exemplo, seria reconhecido como um experimento crucial a favor da teoria de Einstein, anos depois do desenvolvimento da mesma.

Outros autores apontam para o caráter gradual e evolucionário das mudanças conceituais. Villani (1992) destaca elementos reveladores das resistências dos alunos à mudança e conclui que a aprendizagem efetiva em Ciências não envolve apenas mudanças nos conceitos, mas na natureza das questões formuladas, nas entidades básicas envolvidas, nos métodos e na direção a ser perseguida na aprendizagem. Preconiza, também, o não-abandono das idéias prévias, mas sim, um processo lento de mudanças tanto para novos modos de raciocínio quanto para demandas epistemológicas e valores cognitivos (VILLANI, 1992). Nesse sentido, não se deveria esperar que os estudantes considerassem necessária uma reestruturação de suas concepções, a partir de uma situação conflitiva, uma vez que os mesmos não teriam condições de reconhecê-la como tal. Discussões improdutivas ante a uma situação aparentemente perturbadora seriam reflexo desta não-identificação.

Considerando a dificuldade de usar uma estratégia de conflito desde o início de uma seqüência, Rowell e Dawson (1984) optam por começar construindo a melhor teoria para que, depois, o estudante perceba a necessidade de substituir suas concepções prévias. Segundo os autores, dessa forma, a substituição das mesmas pareceria mais plausível para os estudantes.

Uma outra questão bastante polêmica do construtivismo é a crença de que, a partir das idéias de senso comum dos estudantes, poder-se-ia dar um salto rumo ao conhecimento científico. Esta postura encara o aluno já como um cientista e supervaloriza suas explicações e idéias prévias (SOLOMON apud MORTIMER, 1996, p. 23). Scott (1993) constata que as explicações dos alunos a fenômenos relacionados com a pressão atmosférica não auxiliam a construção de uma explicação científica, pelo contrário, dificultam a sistematização por noções apriorísticas, como a idéia de vácuo e a ação humana de sugar.

Apesar de termos apresentado, sinteticamente, algumas das críticas ao ensino construtivista segundo o Modelo de Mudança Conceitual de Posner, defendemos que as explicações dos estudantes desempenham sim, um papel fundamental no processo de ensino e são essenciais para o desenvolvimento e análise dos resultados de nossa seqüência didática, direcionando o constante replanejamento da mesma. Entretanto, pensamos que alguns aspectos desse modelo de mudança conceitual precisam ser repensados. Será que, por melhor que seja conduzido o processo educacional, os alunos realmente abandonam suas concepções prévias e as substituem pelas idéias científicas? Este deve ser o objetivo do ensino de ciências?

Não se constitui em novidade o fato de que as pessoas possam exhibir diferentes formas de representar a realidade à sua volta (MORTIMER, 1996, p. 32). Terrazzan aventa que a proposição de troca de conceitos ou significados deveria ser substituída pela coexistência dos mesmos:

Para o avanço das pesquisas sobre processos cognitivos, considero imprescindível que se estabeleçam paralelos entre as idéias, imagens e modelos [...] utilizando a idéia de *discriminação de significados* e a noção de *patamares de concretude* apontada por Machado (TERRAZZAN, 1994, P. 134).

Dependendo da situação, o indivíduo pode utilizar diferentes concepções e representações para interpretar os fenômenos. Essa noção de diversidade de conceituações para a realidade é proposta por Bachelard (1990). Traçando um paralelo entre as visões de ciência, a partir de uma análise histórica e epistemológica da evolução da mesma, este autor propõe a noção de *perfil epistemológico*. Nesta perspectiva, o progresso epistemológico e a superação de um conhecimento anterior não implicam o abandono completo daquilo que foi superado em relação a cada conceito científico. Uma pessoa apresenta um perfil, o qual caracterizará o pensar sobre o referido conceito. Numa escala crescente de abstração, os níveis do perfil são:

- i) *realismo ingênuo* (animismo) – é o pensamento de senso comum; associado à realidade sensorial imediata;
- ii) *empirismo* – está associado à utilização de instrumentos para esta medida;
- iii) *racionalismo clássico* – neste, os conceitos se relacionam de uma forma mais racional, não estando mais tão vinculados a experiências sensoriais;
- iv) *racionalismo completo* – em que as relações entre grandezas se tornariam ainda mais complexas e
- v) *racionalismo discursivo* – trazendo os avanços mais recentes da ciência como estudos sobre sistemas não-lineares, fractais e caos (BACHELARD, 1990, p. 25).

Desta forma, *cada filosofia fornece apenas uma banda do espectro nocional, e é necessário agrupar todas as filosofias para termos o espectro nocional completo de um conhecimento particular* (BACHELARD, 1990, p. 66). Bachelard (1990) designa, também, a constituição de *obstáculos epistemológicos*, afirmando

O nosso racionalismo simples entrava o nosso racionalismo completo e, sobretudo, o nosso racionalismo dialético. Eis uma prova de como as filosofias mais sãs como o racionalismo newtoniano e kantiano podem, em determinadas circunstâncias constituir um obstáculo ao progresso da cultura (BACHELARD, 1990, p. 59).

Em outras palavras, o empirismo das primeiras impressões é contraditório com o conhecimento científico e a necessidade de valorização da abstração aponta a experiência imediata como um obstáculo ao desenvolvimento da mesma (LOPES, 1996). Bachelard complementa ainda

Não se trata de considerar os obstáculos externos, como a complexidade ou a fugacidade dos fenômenos, nem de incriminar a debilidade dos sentidos ou do espírito humano: é no ato mesmo de conhecer, intimamente, onde aparecem por uma espécie de necessidade funcional, os entorpecimentos e as confusões. É aí onde mostramos as causas do estancamento e até do retrocesso, é aí onde discerniremos causas de inércia que chamaremos obstáculos epistemológicos (BACHELARD, 1996, p. 15).

Inspirado nas implicações da interpretação dessas contribuições à luz do processo de ensino-aprendizagem, preconizadas pelo próprio Bachelard, Mortimer (1996) defende que a aprendizagem de ciências deve promover uma ampliação na forma

como os estudantes interpretam essa realidade. Com o objetivo de construir um modelo para descrever a evolução das idéias dos estudantes, tanto em nível individual como no espaço da sala de aula, em decorrência do processo de ensino, Mortimer propõe a noção de perfil conceitual (MORTIMER, 1994). Segundo este autor, este conceito seria mais adequado para estudar a dinâmica da aprendizagem em ciências devido aos seus compromissos didáticos. As zonas do perfil poderiam variar de um conceito para outro. A noção de perfil conceitual é reexaminada por Mortimer (2001), a partir de estudos de sociolinguística. Segundo essa interpretação, os conceitos emergem da comunicação humana, sendo inevitavelmente impregnados por múltiplas perspectivas.

Martins (2004) contesta as diferenças entre o perfil conceitual proposto por Mortimer e o epistemológico de Bachelard. Segundo este autor, não existem motivos concretos para se adotar uma terminologia diferente, uma vez que se trataria da mesma noção. Ferreira (1999) aponta semelhanças entre as duas terminologias, como a hierarquia entre as diferentes zonas, mas distingue diferenças como, no caso do perfil conceitual, privilegiar determinados mediadores e linguagens sociais enquanto mais adequados a determinados contextos. Não objetivando discutir mais profundamente estas diferenças, decidimos adotar a noção de perfil conceitual principalmente por seus compromissos pedagógicos e pela possibilidade de uma maior flexibilização das categorias do perfil.

Dessa forma, adotamos a concepção de aprendizagem como sendo a evolução das zonas de um perfil conceitual e a construção de novas zonas, quando pertinente, estabelecendo uma coexistência de noções, aplicáveis em diferentes contextos, de acordo com a proposta de Mortimer (1994).

Um outro aspecto muito importante a acrescentar é que a tomada de consciência pelo estudante, de seu próprio perfil, é fundamental no processo de ensino-

aprendizagem, pois oportuniza privilegiar determinados mediadores e linguagens sociais, como aqueles mais adequados a determinados contextos (MORTIMER, 1994). Em outras palavras, queremos que um aluno perceba que determinadas concepções e conceitos são diferentes cientificamente e que seja capaz de usar as diferentes noções em situações convenientes.

A tomada de consciência referida propugna um acompanhamento crítico, pelo próprio aprendiz, do processo de assimilação das concepções, modelos e teorias, apontando para o desenvolvimento da metacognição. Num modelo que conceba a coexistência de *diferentes formas de organização do concreto a partir de diferentes sistemas de abstração mediadores* (MACHADO apud TERRAZZAN, 1994, p. 135) num mesmo nível, a metacognição privilegia a ativação e a recuperação de conteúdos e significados, de forma autônoma e consistente (TERRAZZAN, 1994).

Nesse trabalho, adotamos elementos desta abordagem, nos propondo, entre outros objetivos, a analisar a ampliação das zonas do perfil conceitual de tempo dos estudantes, através do contato com a noção de tempo relativístico. Diante do exposto, não almejamos, naturalmente, que os estudantes abandonem suas concepções prévias acerca do conceito de tempo, mas, sim, que os mesmos ampliem essas concepções e que sejam capazes de utilizar, conscientemente, as diversas noções em contextos apropriados. Partimos agora para busca por estratégias de ensino que estejam de acordo com a nossa concepção de ensino-aprendizagem. Assim, na seção seguinte, discutimos sobre o papel do professor no processo de ensino, analisamos as influências das interações sociais entre os pares na aprendizagem do indivíduo e detalhamos uma abordagem de ensino que julgamos essencial para o desenvolvimento de nossas atividades em sala de aula.

2.2 Abordagem Sócio-Interacionista e Momentos Pedagógicos

Na seção anterior, sintetizamos a teoria da reequilibração de Piaget, a qual se destina a analisar o processo da construção do conhecimento através de processos desencadeados nas estruturas cognitivas do sujeito. Entretanto, ao analisar a dinâmica desta construção no ambiente escolar, é essencial considerar a importância da interação do aluno com seus pares e do papel do professor neste processo (GARRIDO, 1996).

A escola é, certamente, uma experiência organizadora central na vida do indivíduo. O caráter polissêmico da educação escolar é evidenciado desde a aquisição de informações, o domínio de novas habilidades, o aperfeiçoamento das já adquiridas, até a exploração de opções, do trato social, assim como da oportunidade de convivência com pessoas cuja experiência vai além da de seu grupo de pertença. Nesta perspectiva, a escola é um dos agentes que amplia horizontes intelectuais e sociais do cidadão.

A concepção da escola como um contexto propício para a construção e a apropriação de conhecimentos e, conseqüentemente, da cidadania, segundo Bolzan (2002), leva à suposição da relevância da aprendizagem mediada para a construção dos saberes de professores e dos alunos, favorecendo a consolidação dos processos cognitivos de ambos.

Nesse sentido, Vygotsky (1994) aponta que o processo de desenvolvimento intelectual na instrução escolar não se define pelo estado de desenvolvimento atual do indivíduo, mas pela relação entre o desenvolvimento real e potencial. Desta forma, o conceito de zona de desenvolvimento proximal da teoria vygotskiana é fundamental. O autor identifica dois níveis de desenvolvimento cognitivo: o real, referente às conquistas já efetivadas pela criança, ou seja, aquilo que a mesma é capaz de fazer de forma autônoma; e o potencial, relacionado às capacidades em vias de serem construídas a partir da colaboração de outros elementos de seu grupo social, isto é, a capacidade de

aprender com outra pessoa. Dessa forma, a zona de desenvolvimento proximal é definida como a distância entre aquilo que a criança faz sozinha (nível de desenvolvimento real) e o que ela é capaz de fazer com a intervenção de um adulto (nível de desenvolvimento potencial). Segundo Vygotsky,

a zona de desenvolvimento proximal define aquelas funções que ainda não amadureceram, mas que estão em processo de maturação, funções que amadurecerão, mas que estão presentemente em estado embrionário. [...] O nível de desenvolvimento real caracteriza o desenvolvimento mental retrospectivamente, enquanto a zona de desenvolvimento proximal caracteriza o desenvolvimento mental prospectivamente (VYGOTSKY, 1994, p. 113).

Aprendizado e desenvolvimento são indissociáveis, uma vez que a aprendizagem possibilita a construção do conhecimento, através da coordenação dos esquemas constituídos (BOLZAN, 2002). O conhecimento é gerado e co-construído coletivamente, na interatividade entre pessoas. Para Vygotsky (1995), as tarefas conjuntas provocam a necessidade de confrontar pontos de vista, oportunizando uma descentralização cognitiva e se traduzindo no conflito sócio-cognitivo, o qual mobiliza as estruturas intelectuais existentes, em prol de progresso intelectual via reestruturação das mesmas.

A interação verbal firma-se na linguagem, entendida como um produto social resultante da cultura, concomitantemente à sua definição enquanto processo individual, servindo de instrumento para pensar e comunicar. A necessidade de comunicação durante uma atividade, de transmissão intencional de um pensamento ou experiência sociocultural entre indivíduos, designa a percepção da linguagem enquanto sistema mediatizador (BOLZAN, 2002).

O conceito de mediação é central para a teoria vygotskiana, uma vez que o indivíduo não tem acesso direto aos objetos, mas acesso mediado, através de recortes do real, operados pelos sistemas simbólicos de que dispõe (REGO, 1995). A mediação é

um processo dinâmico, no qual se utilizam ferramentas culturais essenciais para modelar a atividade, e implica um processo de intervenção intencional de, pelo menos, um elemento em uma relação (BOLZAN, 2002). Segundo Vygotsky (1995), a apreensão das práticas culturais destaca-se pela análise das ações experienciadas no plano social (interpsicológico) e sua passagem para ações internalizadas (intrapsicológico).

O contexto interativo e social é a fonte do desenvolvimento conceitual do indivíduo e caracteriza a organização da atividade comum e do aprendizado do sujeito. O papel do professor, no ensino construtivista baseado na teoria da aprendizagem de Piaget e complementado pela interpretação sócio-interacionista de Vygotsky, é o de promover as perturbações e guiar o processo de reequilíbrio através de aproximações sucessivas ao conhecimento social e historicamente construído e aceito, uma vez que, sem a sua intervenção, dificilmente os alunos alcançariam as formulações das teorias científicas. O professor é o responsável por introduzir os alunos na cultura escolar, servindo de suporte, estímulo auxiliar, e proporcionando seu avanço em relação às conquistas escolares, atuando, portanto, na zona de desenvolvimento proximal dos estudantes. Nessa perspectiva, Aguiar Jr e Mortimer destacam o papel da ação docente:

[...] compreendemos os conflitos como um diálogo, nem sempre harmônico, entre diferentes perspectivas culturais que convivem no seio das sociedades contemporâneas. Nesse sentido, os conflitos não resultam simplesmente da interação entre sujeito e objeto do conhecimento, mas, sobretudo, da emergência de novas exigências epistemológicas introduzidas pelo discurso da ciência, por meio da ação docente. Nas aulas de ciências, frequentemente, os conflitos emergem como resultado de uma longa e paciente intervenção do professor (AGUIAR JR e MORTIMER, 2005, p. 1).

A cultura epistemológica⁴ e o marco institucional dentro do qual se educam os indivíduos são os fatores, segundo Bolzan (2002), que distinguem o ensino de outros tipos de processos que envolvem a aprendizagem cultural. O sucesso de uma proposta abrangendo o trabalho em sala de aula depende do apoio de uma concepção de aprendizagem adequadamente utilizada e concretizada nas atividades específicas e na conduta do professor na sua interação com os estudantes (GARRIDO, 1996). Tendo isso em vista, a metodologia utilizada em nossa intervenção é influenciada pela proposta de Delizoicov e Angotti (1991). Segundo os autores, a prática docente deve permear três etapas, denominadas três momentos pedagógicos: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. Na seqüência, caracterizamos cada uma dessas, detalhando elementos de sua base fundante, sem a intenção de apresentar um tratamento detalhado e exaustivo, uma vez que este modelo é amplamente analisado na literatura específica.

1º Momento Pedagógico: Problematização Inicial

Inspirado na concepção freireana de ensino-aprendizagem, o primeiro momento pedagógico corresponde a uma caracterização dos grupos com quem se trabalha.

Segundo Mizukami,

A busca do tema gerador objetiva explicitar o pensamento do homem sobre a realidade e sua ação sobre ela, o que caracteriza sua práxis. Na medida em que os homens participavam ativamente da exploração de suas temáticas, sua consciência crítica da realidade se aprofunda (MIZUKAMI, 1986, p. 100).

⁴ A cultura epistemológica escolar é definida como a maneira própria de compreender e manifestar a teoria assumida em ação (BOLZAN, 2002, p. 26).

Dessa forma, no primeiro momento pedagógico, o professor apresenta questões e/ou situações-problema para a turma e busca as explicações formuladas pelos estudantes. Esta etapa tem, essencialmente, dois objetivos:

1. Levantar as concepções dos alunos acerca do que vai ser trabalhado, em concordância com as idéias de Freire, que defende a necessidade de partir do saber de experiência feito, e de Snyders, que diz que toda ação pedagógica deve partir da cultura primeira⁵. Os problemas tratados precisam ser significativos para os estudantes, ou seja, o professor deve buscar problemas que partam de situações que sejam plausíveis para os mesmos. Nesse sentido, as perguntas formuladas pelos próprios alunos contribuem significativamente e devem ser incentivadas pelo professor, ao criar um ambiente favorável para o surgimento destes questionamentos.

2. Fazer com que os educandos sintam a necessidade de adquirir outros conhecimentos para explicar as situações propostas. Isto possibilita motivá-los à construção do conhecimento científico sistematizado.

Terrazzan e Auler destacam que:

Neste primeiro momento, caracterizado pela compreensão e apreensão da posição dos alunos frente ao tópico, é desejável que a postura do professor se volte mais para questionar e lançar dúvidas sobre o assunto que para responder e fornecer explicações (TERRAZZAN e AULER, 1996, p. 29).

Ainda, segundo Mizukami, educador e educando são co-participantes do processo educativo, cuja essência é a dialogicidade. A cooperação, a união, a organização e a solução em conjunto dos problemas devem constituir as premissas que regem a intencionalidade educativa (MIZUKAMI, 1986).

⁵ Esta cultura primeira deve ser entendida como aquelas formas de cultura que são adquiridas fora da escola, fora de toda autoformação metódica e teorizada, que não são fruto do trabalho, do esforço, nem de nenhum plano: nascem da experiência direta da vida, nós a absorvemos sem perceber (SNYDERS *apud* TERRAZZAN e AULER, 1996, p. 215).

2º Momento Pedagógico: Organização do Conhecimento

A sistematização dos conhecimentos de Física, através de definições, conceitos, relações e leis, é elaborada neste momento. Para concretizá-la, faz-se necessário um afastamento crítico para o estudo do saber já sistematizado. Este processo de continuidade/ruptura possibilita romper com os limites presentes na cultura primeira promovendo o reconhecimento da cultura elaborada (conhecimento historicamente construído e sistematizado) como mais eficaz para a solução das dúvidas, indagações e aspirações oriundas da primeira (TERRAZZAN e AULER, 1996).

A efetuação deste afastamento ou distanciamento do objeto cognoscível permeia a elaboração de uma representação, pela utilização de técnicas como redução e codificação, implicando em análises num contexto diferente daquele no qual os educandos vivem (MIZUKAMI, 1986). Ainda, esse afastamento permite interpretar os aspectos de sua própria experiência existencial, pela retomada, no terceiro momento pedagógico, das situações geradoras deflagradas no primeiro.

Estes conhecimentos selecionados, transformados em conteúdo escolar, devem permitir não só a compreensão das situações-problema, inicialmente escolhidas, como também daquelas situações emergentes durante o processo de ensino. Isto se torna possível mediante a (re)construção cognitiva, pelos alunos, dos conhecimentos pertinentes à temática em estudo (TERRAZZAN e AULER, 1996, p. 217).

O contato com a cultura elaborada pode ser feito de várias formas: exposição dialogada dos conceitos pelo professor, leitura de textos previamente selecionados, trabalhos extraclasse realizado pelos alunos, apresentação de seminários pelos mesmos, exposição de vídeos didáticos, realização de experimentos, entre outras. Além do mais, a utilização de metodologias diferenciadas é extremamente motivadora para o dinamismo da prática docente e oportuniza um maior envolvimento dos alunos.

A educação é primordial para a passagem de formas mais primitivas de consciência para a consciência crítica, objetivando provocar e criar condições para que se desenvolva uma atitude de reflexão crítica, comprometida com a ação (MIZUKAMI, 1986). Neste enfoque, a conscientização implica um contínuo e progressivo desvelar da realidade, penetrando cada vez mais na essência do objeto que se pretende analisar.

3º Momento Pedagógico: Aplicação do Conhecimento

No terceiro momento, como mencionado anteriormente, retoma-se o problema proposto inicialmente, para sua reinterpretação à luz do conhecimento científico sistematizado no momento anterior. Além disso, outras situações são propostas, algumas até extrapolando o cotidiano dos alunos, para que os mesmos utilizem e reconheçam o conhecimento científico sistematizado como ferramenta pertinente para resolvê-las. Assim como no segundo momento, metodologias diferenciadas devem ser utilizadas para a aplicação do conhecimento.

[...] Deste modo pretende-se que, dinâmica e evolutivamente, o aluno perceba que o conhecimento, além de ser uma construção historicamente determinada desde que apreendido, é acessível a qualquer cidadão, que dele pode fazer uso. Com isso, pode-se evitar a excessiva dicotomização entre processo e produto... (DELIZOICOV e ANGOTTI, 1991, p. 31).

A resposta a cada desafio não só modifica a realidade em que o sujeito está inserido, como também ao próprio agente, de modo progressivo e diferenciado. A elaboração e o desenvolvimento do conhecimento iniciam no mútuo condicionamento, pensamento e prática.

Há necessidade, entretanto, de uma regulação da ação pedagógica e da aprendizagem. O professor deve oferecer ao aluno uma multiplicidade de caminhos cognitivos, a fim de que sejam contempladas as dificuldades. Uma vez que o comportamento de um aluno ante a resolução de um problema depende de suas capacidades cognitivas e de sua representação do mesmo, representação esta entendida

como a cadeia de relações que estabelece entre os diferentes elementos reconhecidos, seria ingênuo imaginar que todos os alunos possam aprender de uma única forma (MIZUKAMI, 1986). O caráter intencional da ação educativa fica à mostra, na medida em que essa promoção postule uma intervenção neste desenvolvimento, ou seja, signifique provocar modificações no sujeito, influenciando no seu pensar e agir por meio da aprendizagem.

No terceiro capítulo, ilustramos a utilização desta metodologia elucidando os momentos pedagógicos em cada um dos encontros nos quais ela foi adotada e evidenciando-os em nossa seqüência didática como um todo.

Na seqüência, abordamos alguns aspectos teóricos da formulação das noções relativísticas de tempo e espaço, abrangendo seu viés histórico e epistemológico. A relevância deste tópico reside na evolução da significação dos conceitos, a qual pode ser integrada ao processo de ensino-aprendizagem, contribuindo para a aceção da construção do conhecimento científico enquanto invenção da mente humana, um dos ideais do presente trabalho, como anteriormente mencionado.

2.3 Física Moderna e Relatividade Restrita: Breve Histórico e Noções Epistemológicas

Quando pensamos em ensinar uma determinada teoria, não podemos desvinculá-la do momento histórico no qual a mesma surgiu, sob o risco de descaracterizar a Física como um empreendimento humano (ARONS, 1997). Neste item, relatamos o período vivido pela ciência no final do século XIX, analisamos epistemologicamente a transição das teorias clássicas para as modernas e sintetizamos as principais motivações que originaram a Teoria da Relatividade Restrita, destacando os aspectos abordados em sala de aula. Essa análise é fundamental para a concepção de nossa proposta de ensino e para que tenhamos uma real dimensão da importância do tema.

2.3.1 Descrição do Cenário

No final do século XIX, diante dos grandes sucessos científicos que tinham ocorrido, havia, tanto na comunidade científica como na sociedade em geral, uma verdadeira crença na supremacia de ciência. A descrição teórica e os dados observacionais da órbita de Urano apresentavam pequenas diferenças, as quais permitiram a previsão da existência de um novo planeta, Netuno, resultado cuja constatação experimental foi considerada um verdadeiro triunfo para a Mecânica Clássica. O desenvolvimento da Termodinâmica, particularmente quanto ao estudo das transformações de energia térmica em mecânica, permitiu o aperfeiçoamento de máquinas térmicas, culminando na primeira Revolução Industrial. Na Física Ondulatória, os fenômenos de interferência e difração alvitavam o caráter ondulatório da luz em detrimento da interpretação corpuscular da mesma. A Eletricidade e o Magnetismo haviam sido unificados pelos trabalhos de Oersted e Faraday e, posteriormente, pelas equações elegantes da teoria eletromagnética de Maxwell. Inúmeras foram as aplicações práticas advindas do Eletromagnetismo, como a geração de energia elétrica e o aperfeiçoamento das comunicações com o telégrafo e o telefone (MARTINS, 2001).

A despeito dos avanços tecnológicos propiciados pelo desenvolvimento da Física, grandes conquistas se deram no campo teórico. Iniciando pela síntese do Eletromagnetismo, buscaram-se, até hoje, explicações cada vez mais gerais rumo à unificação das teorias. A procura pela fundamentação microscópica da Termodinâmica propiciou uma outra grande síntese. Com a teoria cinética dos gases, fenômenos observados macroscopicamente foram associados a propriedades de interações entre as partículas em um nível microscópico. A temperatura passou a ser relacionada com a energia cinética média das partículas de um gás ideal. A pressão de um gás era

entendida como o resultado de colisões dessas partículas com as paredes do recipiente. Deste modo, a termodinâmica era integrada à mecânica. As equações de Maxwell previam a existência de ondas eletromagnéticas, as quais foram posteriormente detectadas por Hertz. Essas ondas deveriam se propagar com a mesma velocidade que a luz, assim, percebeu-se que a luz visível era apenas uma estreita faixa de um espectro de frequências das ondas eletromagnéticas. Dessa forma, a Óptica havia sido atrelada ao Eletromagnetismo.

Em virtude desses avanços e certo de que a Física atingira um estado de conhecimento definitivo, o físico William Thomson (Lord Kelvin), responsável por consideráveis contribuições para o estudo da termologia, em uma conferência proferida em 1900, mencionou que existiam apenas duas pequenas questões a serem resolvidas pela Física, "duas pequenas nuvens" no horizonte: a dificuldade em explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido e os resultados negativos do experimento de Michelson e Morley (MARTINS, 2001).

A primeira nuvem de Kelvin estava relacionada com o problema de desenvolver um modelo para explicar a emissão de radiação térmica por um corpo, relacionando-a com a temperatura do mesmo e com a frequência da radiação, já que esta mostrava independência de outras características, como a forma do corpo, por exemplo (STUDART, 2000). Um dos pioneiros a estudar esse problema foi o físico alemão Gustav Kirchhoff. Ao constatar que o poder de absorção da energia térmica de um corpo está diretamente relacionado com o poder de emissão dessa mesma forma de energia, Kirchhoff imaginou um corpo ideal que seria capaz de absorver totalmente a energia incidida sobre ele. Este corpo, denominado corpo negro⁶, possuiria um altíssimo poder de absorção. Porém, como a emissividade é diretamente proporcional à absorvância, ele

⁶ Podemos obter uma boa aproximação do mesmo se imaginarmos uma cavidade, um forno em equilíbrio térmico, com um pequeno orifício por onde a radiação externa entre e depois fique "presa" devido às múltiplas reflexões e absorções internas.

também deveria ser capaz de emitir toda a radiação térmica que produzisse. Através da decomposição espectral, a radiação térmica pôde ser separada em faixas de frequência (ou comprimentos de onda), assim, foi possível observar a variação da intensidade (potência por área e frequência) dessa radiação, para cada temperatura do corpo ao longo do espectro de frequência e, através da análise dos dados experimentais, obteve-se uma curva característica universal. O desafio era descrever matematicamente o resultado observado experimentalmente, assim como fundamentar essa descrição do ponto de vista físico.

Partindo da análise de dados experimentais, o físico Joseph Stefan concluiu que a emissão de radiação térmica era proporcional à quarta potência da temperatura absoluta de um corpo. Posteriormente, baseando-se na Mecânica Estatística, Boltzmann demonstrou teoricamente essa relação, conhecida como lei de Stefan-Boltzmann (MEDEIROS, 2005).

O alemão Wilhelm Wien, em 1893, propôs uma lei de distribuição espectral da densidade de energia em função da frequência e da temperatura. Essa lei, que ficou conhecida como lei do deslocamento de Wien, permitiu a determinação da temperatura da superfície do Sol a partir da análise do espectro da energia emitida por ele. A função de Wien, entretanto, só correspondia aos resultados obtidos experimentalmente para altas frequências (pequenos comprimentos de onda) e continha em si a Lei de Stefan-Boltzmann. Foi denominada *lei de deslocamento* em função da relação de proporcionalidade inversa entre o comprimento de onda no qual a radiação é máxima e temperatura (STUDART, 2000).

Interpretando a radiação como sendo gerada por ondas estacionárias no interior da cavidade, Lord Rayleigh deduziu uma outra expressão para a radiação térmica. Posteriormente, a expressão foi corrigida pelo físico inglês James H. Jeans ficando

conhecida como equação de Rayleigh-Jeans; seus resultados estavam de acordo com as observações experimentais apenas para baixas frequências (grandes comprimentos de onda). A inadequação da utilização dessa expressão para altas frequências foi, em 1902, denominada de catástrofe ultravioleta, principalmente porque a mesma previa que a intensidade da radiação seria infinita para altas frequências. A quantização da energia dos osciladores constituintes das paredes da cavidade, engendrada por Planck, explicou adequadamente as observações experimentais e a interpolação das equações de Rayleigh e de Wien, dando origem ao desenvolvimento da Mecânica Quântica (MEDEIROS, 2005).

A segunda nuvem de Kelvin estava relacionada com a detecção do éter, meio responsável pela propagação das ondas eletromagnéticas, fundamental para a teoria de Maxwell. A experiência realizada inicialmente por Michelson em 1881 e aperfeiçoada com a ajuda Morley em 1887, tinha como objetivo mostrar que a velocidade da luz seria diferente se fossem comparados dois feixes, um se propagando na mesma direção da translação da Terra e outro em direção perpendicular a este movimento. O problema da detecção do éter, que está diretamente relacionado com a discussão sobre a possibilidade de se detectar o movimento absoluto, foi determinante para o surgimento da Teoria da Relatividade que tem como seu principal fundador o físico alemão Albert Einstein. Por ser o foco principal de nossa pesquisa, detalharemos o desenvolvimento desta teoria posteriormente.

Todavia, essa idéia de que só haveria duas pequenas nuvens no céu da Física é excessivamente otimista, mítica e, certamente, uma visão ingênua do período em que a Física vivia (MEDEIROS, 2005). Na verdade, o cenário das questões que levaram às teorias modernas é muito mais amplo que as duas mencionadas. No campo da experimentação, estudando os fenômenos que ocorriam a pressões muito baixas, como

descargas elétricas em gases rarefeitos, William Crookes descobriu os raios catódicos (MARTINS, 2001). Em 1895, investigando os raios catódicos, Röntgen descobriu uma forma de radiação invisível muito penetrante e não prevista por nenhuma teoria. Chamou essa radiação de raios X, letra normalmente atribuída a incógnitas, justamente pela não compreensão de sua natureza. Em 1897, Thomson realizou uma experiência com raios catódicos na Ampola de Crookes e mostrou que, em virtude de desvios sofridos pelos mesmos ao atravessarem um campo magnético, os raios catódicos seriam constituídos por partículas com carga elétrica negativa (os elétrons) que pareciam sempre iguais, qualquer que fosse o gás utilizado nos tubos. Mas qual seria a relação entre essas partículas e a constituição da matéria? O átomo não seria mais indivisível?

A descoberta da radioatividade em 1896 foi outro problema que carecia de uma explicação. Os estudos preconizados por Henri Becquerel e, posteriormente, aprofundados pelo casal Curie, mostravam a emissão constante e ininterrupta de energia de estranhos elementos. As radiações emitidas eram iguais aos raios X, ou não? E a energia desprendida desses materiais? Por que alguns elementos são radioativos e outros não? Nada disso havia sido esclarecido (MARTINS, 1998).

O jovem alemão, construtor de instrumentos ópticos, Joseph Fraunhofer, usando inicialmente prismas e depois grades de difração, constatou que o espectro solar na realidade contém linhas negras sobre as cores. Com o desenvolvimento de aparelhos como espectroscópio por Kirchhoff e Bunsen, compreendeu-se que cada elemento químico em estado gasoso é capaz de emitir ou absorver luz com um espectro descontínuo de raias, e que o espectro do Sol é produzido pelos gases que o cercam (FIGUEIRAS, 1996). A espectroscopia se tornou um importante método de identificação dos elementos. Mas qual era a explicação física para essas raias? De acordo com a teoria ondulatória da luz, cada linha do espectro deveria estar relacionada

a uma oscilação regular, de uma frequência exata, capaz de emitir ou absorver aquela radiação. O que existia, nos átomos, que pudesse produzir isso?

A interação da luz com a matéria também apresentava seus enigmas. O efeito fotoelétrico (observado inicialmente por Hertz em 1887), que consiste na propriedade que a radiação possui de *arrancar* elétrons de uma determinada superfície metálica, era um deles. Este efeito dependia somente da frequência da luz e do tipo de metal utilizado, e não da intensidade luminosa como era de se esperar, uma vez que, pela teoria ondulatória, a energia da radiação está associada à sua amplitude. Por que isso ocorria?

Além dos intensos conflitos entre as previsões teóricas e as evidências experimentais, havia ainda inconsistências internas entre as próprias teorias dominantes. Segundo Renn (2005), a física clássica pode ser dividida em três grandes grupos, a mecânica, a teoria do calor e a eletrodinâmica. É justamente com a discussão de problemas pertencentes às fronteiras dessas áreas que as novas teorias surgem.

Através do estudo destes problemas de fronteira é que se poderia saber até que ponto os diferentes conceitos das três diferentes áreas eram coerentes entre si. Por outro lado, o descobrimento de incoerências conceituais quando associado a um problema concreto, funciona, tipicamente, como motor de inovações científicas, pois toda tentativa de resolver um problema concreto obriga concomitantemente a que repensemos os conceitos envolvidos e pode, pela transformação destes conceitos ou de teorias inteiras, abrir novos horizontes. Por este motivo os problemas de fronteira da física clássica puderam se tornar os pontos de partida para a superação destas mesmas fronteiras (RENN, 2005, p. 30).

A Figura 1 ilustra esquematicamente os pontos de interseção e os pontos de incisão das teorias modernas.

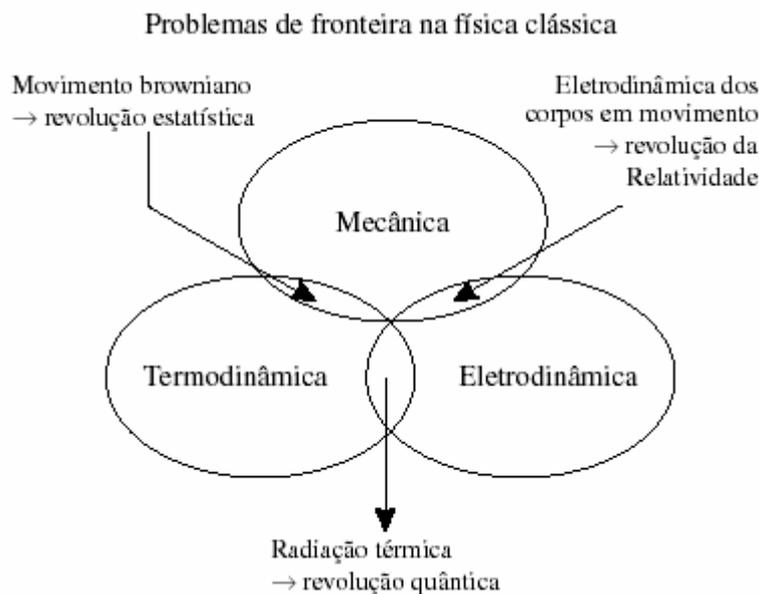


Figura 1: Fronteiras da Física Clássica. Fonte: Renn, 2005.

Assim, percebemos claramente que havia problemas suficientes na Física do final do século XIX. Martins (2001), ironizando a visão das duas nuvens de Kelvin, comenta:

Havia, na verdade, um enorme número de nuvens no horizonte da Física, uma verdadeira tempestade que ameaçava derrubar tudo. Era o otimismo, ou talvez o orgulho de saber muito, que impedia a maioria dos físicos de perceber como a situação era grave (MARTINS, 2001, p. 4).

Todavia, para fazer justiça a Kelvin, deve-se ressaltar a importância de suas pequenas nuvens para o desenvolvimento da Física Moderna. Segundo David Bohm:

Deve-se admitir que Lord Kelvin soube escolher bem suas “nuvens”, uma vez que esses foram precisamente os dois problemas que eventualmente produziram as mudanças revolucionárias na estrutura conceitual da física que ocorreram no século vinte em conexão com a teoria da relatividade e a teoria quântica (BOHM *apud* PEDUZZI, 2005, p. 101).

O período descrito é um dos exemplos mais evidentes do que o epistemólogo americano Thomas Kuhn chama de *crise* na ciência (KUHN, 2001). Esse autor defende que a ciência evolui alternando períodos de *ciência normal*, nos quais a comunidade

científica adere a um *paradigma*⁷, que são interrompidos por *crises* promovidas por problemas teóricos e/ou experimentais. A resposta à *crise* é dada através de uma *revolução científica*, a qual provoca uma mudança conceitual e o estabelecimento de um novo paradigma. Dessa forma, segundo Kuhn, o período vivido pela ciência no final do século XIX era propício para o surgimento de novas teorias.

Muitos são os críticos da visão descontinuista de evolução da ciência proposta por Kuhn. Para Imre Lakatos (1978), a atividade científica é uma constante disputa entre *programas de pesquisa*:

A história da ciência tem sido, e deve ser, uma história de programas de pesquisa competitivos (ou se quiserem, de “paradigmas”), mas não tem sido, nem deve vir a ser, uma sucessão de períodos de ciência normal: quanto antes se iniciar a competição, tanto melhor para o progresso (LAKATOS, 1978, p. 69).

Um programa de pesquisa é caracterizado por um *núcleo duro/firme*, o qual é irrefutável por opção de seus protagonistas, e um *cinturão protetor*, que pode adequar a teoria aos novos fatos/resultados aparentemente contraditórios. Dessa forma, quando uma teoria científica se depara com anomalias, sua *heurística positiva* orienta os cientistas indicando caminhos que poderão explicá-las e transformá-las em corroborações (SILVEIRA, 1996, p. 222).

Por exemplo, ao observarem um planeta que não se move exatamente como deveria, o cientista newtoniano começaria a checar conjecturas sobre refração da luz na atmosfera, propagação da luz em tempestades magnéticas e centenas de outras hipóteses que são partes de seu programa. Ele poderia até inventar um planeta, até então não descoberto, e calcular sua posição, massa e velocidade para explicar a anomalia (LAKATOS, 1978, p. 4).

⁷ O conceito de paradigma tem uma importância central para a epistemologia kuhniana e pode ser entendido como o conjunto de definições, conceitos, crenças, leis, modelos, teorias que compõem o corpo de conhecimento ao qual a comunidade científica adere durante os períodos de ciência normal. É o paradigma vigente que delimita o campo de trabalho e guia os cientistas para os problemas mais importantes a serem pesquisados. É importante destacar que, segundo Kuhn, a completa adesão ao paradigma, por parte dos cientistas, é condição fundamental para o desenvolvimento das teorias. Somente quando os cientistas estão livres de analisar criticamente seus fundamentos teóricos, conceituais e metodológicos é que podem concentrar seus esforços nos problemas de pesquisa enfrentados por sua área (OSTERMANN, 1996, p. 188). A posição de Kelvin retrata muito bem a adesão completa ao paradigma dominante (a física clássica).

Entretanto, se um programa de pesquisa precisar reestruturar permanentemente seu cinturão protetor, criando muitas hipóteses para se adequar às anomalias e manter o seu núcleo duro, Lakatos defende que ele pode se tornar *degenerativo* (ou *regressivo*). Assim, se, neste momento, houver um outro programa que, além de conseguir explicar racionalmente as anomalias presentes, seja capaz de fazer previsões que poderão ser verificadas pela pesquisa futura, demonstrando-se *progressivo*, a comunidade científica tende a optar por este último.

Dessa forma, podemos interpretar o surgimento da Teoria da Relatividade como sendo a resposta dada a um período de crise na ciência (interpretação kuhniana) ou por ter se tornado um programa progressivo em relação a seus competidores (de acordo com Lakatos). Na seqüência, delineamos mais especificamente as motivações para o surgimento da relatividade, enfatizando os aspectos discutidos em sala de aula.

2.3.2 O Surgimento da Relatividade

A Teoria da Relatividade surge de uma incompatibilidade entre duas teorias dominantes no final do século XIX; a Mecânica Clássica, consolidada por Isaac Newton no século XVII, e o Eletromagnetismo, que tratava dos fenômenos elétricos e magnéticos, sintetizado pelas equações de Maxwell.

Um dos principais pilares da mecânica clássica é a inexistência de movimento uniforme absoluto. Todo e qualquer movimento é sempre relativo, ou seja, não tem sentido dizer que um corpo está em movimento, ou em repouso, sem convencionar um ponto de referência. Um mesmo corpo pode estar em repouso, em relação a um referencial, e em movimento em relação a outro. Esse princípio, denominado princípio da relatividade de Galileu, já era bem conhecido desde a época de Newton e foi fundamental para que este descrevesse suas leis para o movimento. De uma maneira

mais ampla podemos dizer que, segundo esse princípio, as leis da mecânica são as mesmas para todos os referenciais inerciais⁸, isto é, não há diferença entre o estado de repouso e o de movimento retilíneo e uniforme. Isso significa que, se uma pessoa estiver dentro de um trem que se desloca com velocidade vetorial constante, tudo em seu interior se passa exatamente como se o trem estivesse parado em relação ao solo. Utilizando as leis da mecânica, não existe nenhuma experiência que possa ser feita dentro do trem que comprove que ele está se movendo (EINSTEIN e INFELD, 1938).

Este princípio não era questionado pelos cientistas no final do século XIX, mas sabiam que o mesmo não se aplicava às leis do eletromagnetismo. As leis de Newton haviam passado pelo teste de prever, com grande precisão, o movimento dos corpos celestes, o que levou a tentativas de formulações alternativas para as equações de Maxwell, infrutíferas quanto à consistência com as leis empíricas já bastante testadas (CHAVES, 2001).

A existência de um referencial absoluto para o eletromagnetismo pode ser evidenciada quando se analisa a velocidade das ondas eletromagnéticas (NUSSENZVEIG, 1998). Das equações de Maxwell, deduz-se que a velocidade da luz no vácuo é constante e vale $c = 3 \times 10^8$ m/s. Porém, como a velocidade é uma grandeza relativa, ou seja, observadores diferentes podem medir velocidades diferentes para um mesmo móvel, a luz se moveria com esta velocidade em relação a quê?

A resposta dos físicos, inclusive de Maxwell e de Lorentz, era de que esta era a velocidade da luz em relação ao éter. O éter seria um meio sutil, do qual o universo se constituía. Sua existência era praticamente incontestável entre os cientistas e justificada pelo caráter ondulatório da luz, comprovado quando se evidenciou que a mesma sofria os fenômenos de difração e interferência. Assim como toda onda, a luz também

⁸ Referencial inercial é aquele no qual a primeira lei de Newton (lei da inércia) é válida.

precisaria de um meio para se propagar. *A luz não pode ser vista se não houver um meio que a transporte, do mesmo modo que o som não pode ser ouvido* (PAIS, 1982, p. 157).

No entanto, este meio deveria apresentar algumas propriedades intrigantes. Deveria ser extremamente rígido para propagar uma perturbação, como a luz, com uma velocidade tão intensa, mas não poderia ser viscoso, pois retardaria o movimento dos planetas e estes seriam inevitavelmente atraídos pelo campo gravitacional do Sol.

Devido à importância do éter, muitos físicos se dedicaram a desenvolver experiências que comprovassem sua existência, dentre elas, a mais precisa e conclusiva, foi realizada pela primeira vez em 1881 por Albert A. Michelson e posteriormente aprimorada com o auxílio de Eduard W. Morley. Teoricamente, poderíamos constatar o movimento da Terra através do éter medindo a velocidade da luz em direções diferentes, por exemplo, uma paralela e uma perpendicular ao deslocamento da Terra em relação ao éter (movimento de translação), pois a velocidade da luz não seria isotrópica. Este era exatamente o objetivo da experiência de Michelson-Morley, entretanto, haveria uma grande dificuldade em medir essa diferença, tendo em vista a comparação entre a velocidade de translação da Terra e a da luz. Com o desenvolvimento de um genioso, e extremamente preciso, instrumento denominado interferômetro, Michelson pretendia dividir um feixe de luz em direções perpendiculares e mostrar que os mesmos deveriam percorrer distâncias iguais em tempos diferentes em virtude da diferença de suas velocidades em relação à Terra. Para a surpresa e frustração da comunidade científica, após inúmeras tentativas, o resultado esperado não foi atingido, isto é, a existência do éter não foi comprovada experimentalmente. Como o resultado obtido experimentalmente contrastava com as previsões teóricas, os físicos procuraram reavaliar seus pressupostos teóricos.

Na década de 1880, Lorentz desenvolveu uma sofisticada teoria que explicava,

para todos os referenciais em movimento relativo uniforme, praticamente todos os processos eletromagnéticos ou ópticos conhecidos (RENN, 2005). Para adequar esta teoria ao resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, Lorentz introduziu uma variável auxiliar, denominada tempo local, a qual não era diretamente acessível à verificação experimental, mas essencial à teoria. Além disso, sua teoria, em concordância com as idéias de Fitzgerald, também passou a admitir a hipótese de que haveria um encurtamento dos corpos na direção do movimento. Esse encurtamento, denominado contração de Lorentz-Fitzgerald, seria associado a um efeito elástico decorrente de uma suposta alteração da força elétrica para cargas em movimento em relação ao éter. Estas hipóteses não abandonariam a necessidade da existência do éter (referencial absoluto), mas adequariam a teoria às evidências experimentais.

Holton (1969) constata que é muito difundida na literatura a idéia de que o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley tenha sido crucial para a origem da teoria da relatividade. O autor apresenta trechos de artigos escritos em publicações de alta credibilidade e por físicos de renome que evidenciam essa concepção: *A teoria da relatividade restrita começou como uma generalização do resultado da experiência de Michelson* (MILLIKAN, *apud* HOLTON, 1969, p. 970). *A experiência de Michelson foi fundamental para a teoria da relatividade* (LAUE, *apud* HOLTON, 1969, p. 971).

Segundo Holton, esta é uma visão totalmente equivocada, baseada em uma concepção “experimentalista” de ciência que supervaloriza os resultados experimentais e que acredita que as novas teorias são respostas a anomalias detectadas experimentalmente. Entretanto, quando perguntado sobre a relevância da mesma para a gênese de sua teoria, Albert Einstein contrapõe:

Sobre meu próprio trabalho, o resultado de Michelson não exerceu influência considerável. Nem mesmo me lembro se o conhecia quando escrevi, pela primeira vez, sobre o assunto em 1905. A razão reside em que eu estava, por motivo de ordem geral,

firmemente convencido de que o movimento absoluto não existe e meu problema se resumia em saber como conciliar esse ponto com o conhecimento que temos da eletrodinâmica. Entende-se, assim, porque, em minha obra pessoal, não coube papel, ou pelo menos, papel decisivo ao experimento de Michelson (EINSTEIN, *apud* HOLTON, 1969, p. 969).

Dessa forma, fica evidente que o principal problema que motivou a relatividade foi a não validade do princípio da relatividade para os fenômenos eletromagnéticos. Em um de seus mais importantes artigos, publicados em 1905, Einstein descreve como exemplo dessa incoerência a seguinte experiência: quando uma espira está em repouso e aproximamos dela um ímã, uma corrente elétrica surge nesta espira, pois, de acordo com a lei de Faraday, a variação do fluxo magnético que atravessa uma espira provoca uma força eletromotriz induzida que causa a corrente. Por outro lado, se o ímã estiver parado e a espira se mover, aproximando-se dele, o surgimento da corrente elétrica é explicado por outro motivo: cargas elétricas em movimento, em uma região de campo magnético, estão sujeitas a uma força magnética proporcional à intensidade do campo magnético, da velocidade e da carga, que depende também do ângulo entre a direção do campo e da velocidade, conforme a bem conhecida parte magnética da força de Lorentz. Essa força magnética atua sobre os elétrons livres da espira, causando a corrente. Einstein acreditava que a causa da corrente deveria ser explicada da mesma forma, quer estivesse a espira parada e o ímã em movimento, ou vice-versa. Aliás, esta distinção de repouso ou movimento seria uma mera questão de definição de referencial (EINSTEIN *apud* STACHEL 2001, p. 143).

Assim, para ele, o princípio da relatividade deveria ter validade geral, e não apenas para as leis da mecânica. Na verdade, a hipótese de que o princípio da relatividade teria validade geral já havia sido proposta por Poincaré em 1900, entretanto o mesmo a encarava como um fato experimental, associado à impossibilidade de se detectar o movimento absoluto em função das alterações provocadas no móvel devido

ao seu movimento em relação ao éter (MARTINS, 2005).

Desde muito jovem, Einstein já refletia sobre questões relacionadas com princípios físicos. Em suas notas autobiográficas, ele mesmo conta que, aos 16 anos de idade, deparou-se com um enigma que seria o germe da teoria da relatividade. Pensando sobre o que aconteceria se fosse possível alcançar um raio de luz, ele percebeu que haveria uma incoerência com o princípio da relatividade. Para ele, a luz era um fenômeno por si só e, como a constância de sua velocidade seria uma das leis da natureza, não deveria ser diferente somente pela mudança na velocidade do observador. Este paradoxo é enunciado pelo próprio Einstein:

Se eu pudesse seguir um raio de luz com velocidade c (a velocidade da luz no vácuo), o raio luminoso me apareceria como um campo eletromagnético oscilante no espaço, em estado de repouso. Mas nada disso parece acontecer com base na experiência de Maxwell. Desde o começo pareceu intuitivamente claro para mim que do ponto de vista de um tal hipotético observador, tudo deveria acontecer segundo as mesmas leis que valem para um observador em repouso na Terra. Pois como poderia o primeiro observador saber, isso é, como poderia determinar que ele está em movimento uniforme rápido? Percebe-se que neste paradoxo está já contido o germe da Relatividade Especial (EINSTEIN *apud* VILLANI, 1981, p. 41).

Uma outra forma de visualizar esse dilema se dá através de uma experiência de pensamento proposta por Einstein: “O que aconteceria se eu me movesse na velocidade da luz segurando um espelho à minha frente? Será que conseguiria ver minha imagem?” Se a luz se movesse com velocidade de $c = 3 \times 10^8$ m/s, em relação ao éter, ele não conseguiria ver sua imagem, pois como ele estaria se deslocando na mesma velocidade, o raio não atingiria o espelho (HEY e WALTERS, 1997; OLIVEIRA, 2005). No entanto, isso questionaria o princípio da relatividade, uma vez que ele saberia que está se deslocando em movimento retilíneo e uniforme através de uma experiência feita no interior do próprio móvel.

Em 1905, Einstein publica *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento* no qual ele apresenta pela primeira vez, as idéias básicas de sua teoria, que iria

posteriormente ser chamada de Teoria da Relatividade Restrita. O trecho a seguir, retirado desse artigo, permite-nos perceber os problemas que o físico estava objetivando resolver:

Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell – tal como usualmente entendida no momento -, quando aplicada a corpos em movimento, produz assimetrias que não parecem ser inerentes ao fenômeno. [...] Exemplos desse tipo - em conjunto com tentativas malsucedidas de detectar um movimento da Terra relativo ao “meio luminífero” – levam à conjectura de que não apenas os fenômenos da mecânica, mas também os da eletrodinâmica, não têm propriedades que correspondam ao conceito de repouso absoluto. (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2001, p.143)

Em seguida, o autor propõe os dois postulados que constituem a base para a Teoria da Relatividade Restrita e que, segundo ele, resolveriam o problema da não validade do princípio da relatividade aos fenômenos eletromagnéticos. O primeiro postulado seria uma generalização do princípio da relatividade para todos os fenômenos da natureza:

Postulado 1. As leis da física assumem a mesma forma em todos os referenciais inerciais (PAIS, 1982, p.160)

E o segundo pode ser visto como uma extensão do primeiro, uma vez que a constância da velocidade de propagação da luz seria, também, uma das leis da natureza:

Postulado 2. 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 uniforme (PAIS, 1982, p.160).

Partindo desses dois postulados, segundo Einstein, a existência do éter seria “supérflua”. Nas palavras de Pais, *a teoria da relatividade restrita retirou do éter sua principal propriedade mecânica, o repouso absoluto, e, conseqüentemente, tornou-o redundante* (PAIS, 1982, p.157). Assim, os experimentos para detectar sua existência, como o de Michelson-Morley, não seriam coerentes, pois estariam tentando detectar o movimento absoluto da Terra e, conseqüentemente, desrespeitando os postulados da

relatividade. Segundo Martins (2005), uma das maiores contribuições dada pela teoria de Einstein é de ordem epistemológica, e não física. Para aquele autor, as bases principais da teoria da relatividade já estavam consolidadas por Lorentz e Poincaré quando Einstein publicou seu artigo em 1905, entretanto, deve-se a ele a opção de eliminar a necessidade do éter, baseada em uma concepção empirista de que a física só deveria lidar com aquilo que pode ser observado e medido (MARTINS, 2005).

Existe, entretanto, uma contradição entre estes dois postulados, se pensarmos de acordo com a mecânica clássica. Nesta teoria, a velocidade é uma grandeza relativa e a transformação galileana é utilizada para se calcular a velocidade de um corpo em relação a outro. Porém, o segundo postulado afirma que a velocidade da luz é absoluta, isto é, possui o mesmo valor para todos os referenciais. Logo, alguma mudança na mecânica newtoniana também deveria ocorrer.

Essa mudança passa pela reformulação, ou melhor, por uma redefinição dos conceitos de tempo e espaço. Para a mecânica newtoniana, o tempo é uma grandeza absoluta, ou seja, diferentes observadores sempre medem o mesmo intervalo de tempo para um certo evento. Newton (*apud* NUSSENZVEIG, 2002) definiu o conceito de tempo absoluto como:

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui uniformemente, sem relação com nenhuma coisa externa, e é também chamado de duração (NUSSENZVEIG, 2002, p. 21).

Para o físico Ernst Mach, cujas idéias exerceram grande influência sobre Einstein, os conceitos de espaço e tempo não são mais que construções do espírito humano, derivadas e sempre relativas ao conceito primário de matéria (CARNEIRO, 2005). Einstein postula, diferentemente de Newton, que a velocidade da luz seja uma grandeza absoluta, e o tempo, portanto, passa a ser relativo. Isso significa que o

intervalo de tempo medido e a simultaneidade entre eventos dependeriam do referencial.

Sistematizando essa diferença: dado um referencial S , com origem em O , pode-se determinar um evento ocorrido no mesmo por três coordenadas espaciais x , y , e z e uma temporal, t . Analogamente, para um referencial S' , com origem em O' , que se desloca com velocidade uniforme v na direção do eixo x , em relação a S , o mesmo evento é caracterizado pelas três coordenadas espaciais x' , y' e z' e pela temporal t' . Considerando que em $t = t' = 0$, O coincida com O' , a mecânica clássica utiliza as transformações de Galileu para relacionar as coordenadas espaciais e temporais entre esses dois referenciais:

$$x' = x - vt \qquad t' = t.$$

Entretanto, o segundo postulado de Einstein impõe que a velocidade da luz seja a mesma para qualquer referencial, e isto está em desacordo com a lei de adição de velocidades decorrente das transformações de Galileu. Assim, partindo de seus dois postulados, Einstein deduz outras expressões para efetuar as transformações de coordenadas espaciais e temporais entre dois sistemas inerciais:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Estas expressões já haviam sido propostas, de forma independente, por Larmor, em 1898, e Lorentz, em 1904 com o objetivo de tornar as equações de Maxwell invariantes mediante uma mudança de referencial, entretanto, com uma interpretação totalmente diferente da feita por Einstein. Essa lei era considerada como um artifício matemático, baseada em uma impossibilidade experimental, e adequaria os princípios da mecânica ao resultado negativo da experiência de Michelson-Morley. Essas equações ficaram conhecidas como as transformações de Lorentz.

Assim, a noção de tempo absoluto da mecânica newtoniana é profundamente alterada na concepção relativística. Nessa perspectiva, o tempo passa a ser encarado

como uma dimensão a mais e simetricamente dependente das dimensões espaciais. Portanto, os eventos passam a ser descritos em um espaço quadridimensional, denominado espaço-tempo.

As leis da natureza que satisfazem às exigências da Teoria da Relatividade (Restrita) assumem então formas matemáticas nas quais a coordenada do tempo desempenha exatamente o mesmo papel que as três coordenadas do espaço (EINSTEIN, 1999, p. 50).

Para perceber as conseqüências da cinemática relativística, vamos recorrer a um exemplo semelhante ao relógio de luz proposto por Feymann. Considere que uma fonte luminosa, localizada no chão do vagão de um trem deslocando-se em movimento retilíneo e uniforme com velocidade v , emita um raio de luz na direção vertical. Este raio é refletido por um espelho localizado no teto do trem, logo acima da fonte, e retorna ao ponto de onde partiu. A trajetória descrita pelo raio, quando observado por uma pessoa no interior do trem (observador O), é uma linha reta vertical. Definindo como d a altura do trem, pode-se calcular o intervalo de tempo gasto pelo raio de luz em seu trajeto de subida e descida como

$$\Delta t_0 = \frac{2d}{c}$$

na qual c é a velocidade da luz e Δt_0 é denominado intervalo de tempo próprio, pois o mesmo é medido em um referencial que está em repouso em relação ao evento.

Porém, para um observador localizado fora do trem e em repouso em relação ao solo, o raio segue uma trajetória diferente. Para ele, a luz percorre uma distância maior, devido ao movimento do trem e, como a velocidade da luz é a mesma (conforme o segundo postulada), o tempo medido será maior. Utilizando o teorema de Pitágoras, o intervalo de tempo gasto pelo raio de luz é igual a

$$\Delta t = \frac{2d}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Mas, como $\Delta t_0 = \frac{2d}{c}$, obtemos

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Denominando a relação $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ de fator γ , a expressão que relaciona os intervalos de tempo medidos pelos dois observadores é

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0.$$

Dessa forma, podemos determinar a diferença entre os intervalos de tempo medidos através de uma análise do fator γ . Seu valor depende da velocidade do vagão; para velocidades muito menores que a da luz, como as tipicamente manifestas no cotidiano, γ tende a um, e o tempo medido pelos dois observadores é praticamente o mesmo, não havendo discrepância com os resultados da mecânica newtoniana. Entretanto, quando a velocidade do vagão é considerável em relação à velocidade da luz, γ torna-se significativo e a diferença dos tempos medidos pelos observadores também. Como γ é maior que um, para o observador em repouso em relação à fonte de luz, tudo ocorre como se o tempo passasse mais lentamente em comparação ao observador em movimento em relação à mesma. Este efeito é denominado dilatação do tempo (CHAVES, 2001).

Uma outra consequência prevista pela relatividade pode ser deduzida a partir da expressão da dilatação temporal. Suponha que o observador localizado fora do trem esteja segurando uma régua. Denominamos de L_0 o comprimento da mesma medido por ele. Este é o comprimento próprio da régua uma vez que ela está em repouso em relação a este observador. Entretanto, para o observador localizado no interior do trem, a régua se encontra em movimento com uma velocidade v . Os dois observadores podem medir o comprimento da régua da seguinte forma: multiplicando a velocidade do trem v pelo

intervalo de tempo medido entre a passagem do início e o fim da régua. Devido à dilatação temporal, os tempos medidos serão diferentes e, conseqüentemente, os comprimentos obtidos também diferirão. Denominando L o comprimento medido pelo referencial localizado no interior do trem, temos

$$L = v\Delta t_0 = \frac{v\Delta t}{\gamma} = \frac{L_0}{\gamma}.$$

Como γ é maior que um, o comprimento da régua medido por um observador em movimento em relação a ela (L) é menor do que o comprimento medido por um referencial em repouso em relação à mesma (L_0). Analogamente à discussão anterior, esse fenômeno, denominado contração do comprimento, tornar-se-á cada vez mais significativo à medida que a velocidade do trem se aproxima da velocidade da luz (CHAVES, 2001).

Einstein fez uma nova teoria do espaço e do tempo e, com isso, uma nova cinemática. Os conceitos de tempo e espaço absolutos da teoria newtoniana passaram a ter um caráter relativo na teoria de Einstein. Porém, conforme descrevemos anteriormente, as diferenças entre medidas de tempo e de comprimento só passam a ser significativas em altas velocidades ($v > 0,1c$). Dessa forma, para as velocidades presentes em nosso mundo, esses efeitos não seriam percebidos e a mecânica newtoniana poderia continuar sendo aplicada.

Questionando o conceito de realidade, Bunge (1985) defende que a mecânica newtoniana pode ser encarada como um caso particular da relativística para baixas velocidades. Assim, poder-se-ia deduzir as equações da mecânica clássica, partindo das expressões relativísticas, ou seja, γ seria igual a 1 para velocidades muito inferiores à velocidade da luz.

Em contrapartida, baseando no conceito de incomensurabilidade⁹ de paradigmas, Kuhn sustenta que a mecânica newtoniana não pode ser derivada da relativística, constituindo-se em um caso particular da mesma, uma vez que, ontologicamente, conceitos básicos como espaço, tempo e matéria seriam completamente diferentes nessas duas teorias.

O que anteriormente se entendia por espaço era algo necessariamente plano, homogêneo, isotrópico e não afetado pela presença de matéria. Não fosse assim, a física newtoniana não teria produzido resultados. Para levar a cabo a transição ao universo de Einstein, toda a teia conceitual cujos fios são o espaço, o tempo, a matéria, a força, etc... teve que ser alterada e novamente rearticulada em termos do conjunto da natureza (KUHN, 2001, p. 189).

Aos que acreditam na possibilidade dessa derivação e vêem o conhecimento como uma contínua evolução, a resposta de Kuhn é taxativa:

O argumento mais sólido e mais conhecido em favor dessa concepção restrita de teoria científica emerge em discussões sobre a relação entre a dinâmica einsteiniana atual e as equações dinâmicas mais antigas que derivam os *Principia* de Newton. Do ponto de vista deste ensaio, essas duas teorias são fundamentalmente incompatíveis, no mesmo sentido que a astronomia de Copérnico com relação à de Ptolomeu: **a teoria de Einstein somente pode ser aceita caso se reconheça que Newton estava errado.** (KUHN, 2001, p. 132-33, grifo nosso).

Bachelard, outro defensor do descontínuismo da ciência, também defende a diferença entre essas duas teorias:

Mesmo sob aspecto simplesmente numérico, enganamo-nos, acreditamos, quando vemos no sistema newtoniano uma primeira aproximação do sistema einsteiniano, pois que as sutilezas relativistas não decorrem de uma aplicação aperfeiçoada dos princípios newtonianos. Não se pode, portanto, dizer corretamente que o mundo newtoniano prefigura em suas grandes linhas o mundo einsteiniano. [...] Não há, portanto, transição entre o sistema de Newton e o sistema de Einstein. (BACHELARD, 1985, p. 43-44).

⁹ Segundo Kuhn, dois paradigmas são *incomensuráveis*, isto é, a linguagem utilizada para explicar fenômenos, os problemas considerados cruciais e até mesmo os elementos básicos constituintes da natureza são diferentes para cientistas adeptos a paradigmas diferentes. Uma discussão racional entre eles não é possível; o paradigma antigo não é convertido em um novo, mas eventualmente desaparece.

Em uma tentativa hipotética, Kuhn chega a analisar a possibilidade da derivação das leis de Newton partindo das equações da relatividade e mostra que a mesma seria artificial:

A dinâmica newtoniana pode realmente ser derivada da dinâmica relativística? A que se assemelharia essa derivação? Imaginemos um conjunto de proposições E_1, E_2, \dots, E_n , que juntas abarcam as leis da teoria da relatividade. Essas proposições contêm variáveis e parâmetros representando posição espacial, tempo, massa em repouso [...] Para demonstrar a adequação da dinâmica newtoniana como um caso especial, devemos adicionar aos E_i proposições adicionais, tais como $(v/c)^2 \ll 1$, restringindo o âmbito dos parâmetros e variáveis. Esse conjunto ampliado de proposições é então tão manipulado de molde a produzir um novo conjunto N_1, N_2, \dots, N_n , que na sua forma é idêntico às leis de Newton relativas ao movimento, à gravidade e assim por diante. Desse modo, sujeita a algumas condições que a limitam, a dinâmica newtoniana foi aparentemente derivada da einsteiniana (KUHN, 2001, p. 135-36).

Porém, o autor argumenta que essa derivação seria ilegítima, pois o conjunto N_1, N_2, \dots, N_n não seria formado por proposições newtonianas, ou seja, não obteríamos as leis de Newton, uma vez que conceitos e variáveis fundamentais têm definições e interpretações distintas nas duas teorias. Por exemplo, a massa newtoniana é conservada, a einsteiniana é conversível em energia; o tempo para Newton é absoluto, enquanto que para Einstein o mesmo é uma função da velocidade do corpo; o comprimento de um corpo é uma constante na mecânica newtoniana e se contrai na direção do movimento para a relativística. Assim, Kuhn conclui:

A menos que modifiquemos as definições das variáveis dos N_i , as proposições que derivamos **não são newtonianas**. Se as mudamos, não podemos realmente afirmar que *derivamos* as leis de Newton, pelo menos não no sentido atualmente aceito para a expressão “derivar” (KUHN, 2001, p. 136, grifo nosso).

Exemplificando a visão kuhniana imaginemos dois cientistas, um newtoniano e um einsteiniano, medindo grandezas como tempo, comprimento e massa para diferentes referenciais em movimento relativo com velocidades muito inferiores à da luz (domínio da mecânica clássica). Qual significado físico teria a redução matemática das expressões

relativísticas $l = l_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$, $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ e $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ para $l = l_0$, $\Delta t = \Delta t_0$ e $m = m_0$, respectivamente, quando $(v/c)^2 \ll 1$?

Na verdade, quando excluímos termos desprezíveis de uma sentença matemática, estamos apenas fazendo uma aproximação. Assim, enquanto o newtoniano acredita piamente que $l = l_0$, $\Delta t = \Delta t_0$ e $m = m_0$, o einsteiniano sabe que comprimento, tempo e massa são funções da velocidade (PEDUZZI, 1998). Eles poderiam até medir valores iguais para a massa de um corpo em movimento, por exemplo, porém, suas interpretações seriam bem diferentes:

Enquanto o observador newtoniano se dá por satisfeito com os resultados da experiência, o einsteiniano tem consciência de que a não detecção do efeito relativístico previsto se deveu à utilização de instrumentos com um grau de precisão aquém daquele demandado pela teoria [...] Para pequenas velocidades, os efeitos relativísticos podem não ser macroscopicamente perceptíveis, mas, o que é importante, não deixam de existir (PEDUZZI, 1998, p. 708).

O próprio Einstein parece concordar com a visão kuhniana de incompatibilidade entre a sua teoria e a de Newton:

Perdoa-me, Newton. A via que abriste era talvez a única possível, à época, para um homem dotado do mais alto raciocínio e poder criativo. Os conceitos que criaste ainda hoje orientam o nosso pensamento na Física, embora saibamos que têm de ser **substituídos** por outros, mais afastados da esfera da experiência imediata, para possibilitar a compreensão mais profunda das relações existentes entre as coisas (EINSTEIN *apud* PEDUZZI, 1998, p. 674, grifo nosso).

Portanto, para a epistemologia de Kuhn, as teorias científicas são substituídas por outras, incompatíveis com suas antecessoras, nas chamadas revoluções científicas. A mecânica newtoniana não poder ser vista como um caso particular da relativística, pois a segunda substitui a primeira, não sendo, portanto, uma ampliação da mesma.

Por concordarmos com a visão kuhniana em relação às diferenças entre a teoria newtoniana e einsteiniana, adotamos aspectos dessa concepção em nossa proposta de

ensino. Em nossas aulas, destacamos as diferenças entre os conceitos newtonianos e einsteinianos de tempo e espaço, enfatizando que a impossibilidade de se perceber a relatividade do tempo e do comprimento em experiências cotidianas está vinculada à falta de precisão dos instrumentos que possuímos, mas isso não significa que essas diferenças inexistam, como prevê a teoria de Newton.

Na seção seguinte, descrevemos propostas e alternativas didáticas para o ensino de relatividade, resultantes de uma revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa.

2.4 Revisão da Literatura: Propostas e Alternativas Didáticas

Como estamos nos propondo a elaborar uma intervenção de ensino, procuramos levantar os trabalhos semelhantes constantes na literatura. Assim, uma etapa fundamental de nossa pesquisa foi justamente a realização de uma revisão bibliográfica dos trabalhos que se dedicaram ao ensino de relatividade, sem a pretensão de a mesma ser exaustiva. Na seqüência, descrevemos sinteticamente algumas das propostas e alternativas didáticas encontradas, evidenciando a multiplicidade de opções metodológicas e destacando os aspectos positivos de cada uma delas.

Angotti *et al.* (1978) idealizaram e aplicaram uma seqüência que se destaca não só pelas inovações metodológicas, como também pela ordem utilizada dos conteúdos. Diferentemente da simples apresentação dos conteúdos usual, o método de ensino adotado tem como estruturante a discussão das situações apresentadas com os alunos e a busca da explicação dos mesmos aos fenômenos apresentados, na linha do conflito sócio-cognitivo, como proposto por Vygotsky. O módulo foi dividido em cinco unidades. Na primeira, intitulada Dinâmica Relativística, os alunos assistiram ao filme *Ultimate Speed*, o qual mostra elétrons aumentando suas velocidades em um acelerador de partículas. Os estudantes foram convidados a dar explicações para um resultado experimental que contradiz a teoria clássica. A unidade terminou com o conceito de

massa relativística e a relação massa-energia como explicações para as evidências experimentais. A Cinemática Relativística foi abordada na segunda unidade a partir da apresentação de um outro filme (*Time Dilation – An Experiment with μ -Mésons*), o qual apresenta uma discussão sobre o resultado inesperado da detecção de múons ao nível do mar. Também, uma discussão foi proposta para analisar o resultado inusitado. A relatividade da simultaneidade foi abordada na unidade subsequente através de uma experiência de pensamento e os alunos questionados quanto à noção de realidade dos conceitos físicos. A quarta unidade possuiu um caráter opcional e apresentou as transformações de Lorentz como uma consequência direta da dilatação temporal e contração do comprimento. Na última unidade, é oferecido um breve histórico da teoria da relatividade, levantando algumas implicações tecnológicas e sociais da mesma.

Apesar de não seguir as etapas e as inconsistências enfrentadas por Einstein para a elaboração da teoria da relatividade, didaticamente, essa proposta é muito interessante, pois busca a explicação dos alunos e justifica a necessidade de reformulação de conceitos a partir de evidências experimentais, o que concorre para a plausibilidade da teoria. Este módulo foi aplicado, em caráter facultativo, com alunos do ensino superior, porém, sua metodologia certamente pode ser adaptada para o Ensino Médio.

Uma das previsões mais incríveis da relatividade restrita é a dilatação temporal. Segundo Hall (1978), durante o processo de ensino, espera-se que os alunos busquem evidências experimentais desta consequência. Porém, o autor acredita que experiências, como as que tratam da meia vida de partículas ou de plataformas giratórias, não são muito úteis didaticamente por estarem desvinculadas da realidade dos estudantes, especialmente em nível médio. Hall aponta a experiência de Hafele-Keating¹⁰ como a

¹⁰ Experiência realizada pelos físicos Joseph Hafele e Richard Keating, em 1971. Relógios atômicos de césio foram colocados no interior de aviões comerciais para viagem ao redor da Terra. Ao retornarem, esses relógios foram comparados com o localizado no observatório naval de Washington e, inicialmente síncronos, registraram um atraso muito próximo ao previsto pela teoria da relatividade.

mais convincente, uma vez que os alunos podem compreender facilmente a situação na qual são medidos atrasos em relógios atômicos a bordo de aviões em relação aos que ficaram na Terra.

Rosser (1979) aponta para um redirecionamento do ensino de relatividade em nível superior, a fim de alterar sua seqüência e incluir evidências experimentais, além da experiência de Michelson-Morley. Dentre as principais mudanças propostas pelo autor, destacamos:

1. Não precisamos mencionar a teoria do éter e a necessidade de um meio de propagação para a luz, se os estudantes tiverem contato com o conceito de fóton e analisarem a luz como um fluxo de partículas.

2. Atualmente, foram desenvolvidas diversas experiências no campo da física de alta energia, utilizando raios cósmicos e aceleradores de partículas. Como a mecânica newtoniana já se mostrou incapaz de explicar os resultados destas experiências, os alunos poderão perceber a inadequação desta teoria para a análise destes fenômenos.

3. A utilização de radares já é conhecida. Com o advento das viagens espaciais, os estudantes admitem que leve certo tempo para transmitir sinais para um observador distante, como para um astronauta na Lua.

4. Existe uma comprovação experimental do postulado da constância da velocidade da luz. Por exemplo, Alvager *et al.* (1964) mostraram que a velocidade de fótons emitidos na desintegração de píons, estes se deslocando a uma velocidade de $0,9957 c$, foi de $2,9977 \times 10^8$ m/s, em concordância com experiências que mediram a velocidade de fótons emitidos por fontes estacionárias (ROSSER, 1979, p. 214).

Como metodologia de abordagem da relatividade restrita, Ryder (1987) delinea um paralelo entre a mecânica newtoniana, desde os experimentos propostos por Galileu (como o das esferas girantes em um plano inclinado) e a influência dos mesmos na formulação de espaço e tempo absolutos, propostos por Newton. Nesse artigo, o autor apresenta a discussão de uma situação envolvendo adição de velocidades, cujo resultado previsto pela teoria clássica é maior que a velocidade da luz, com a finalidade de mostrar uma inconsistência na teoria de Newton e introduzir a teoria da relatividade.

Utiliza ainda, um exemplo numérico de uma famosa experiência de pensamento¹¹ de Einstein, para tratar a relatividade da simultaneidade.

Na abordagem das conseqüências da relatividade restrita e obtenção da dilatação temporal e contração do comprimento com alunos de Ensino Médio, Daly e Horton (1994) propõem uma experiência de pensamento. Nessa experiência, descrita no item 2.3, um raio de luz é refletido por dois espelhos paralelos. Uma análise qualitativa da mesma possibilita que os estudantes percebam a dilatação temporal e, através da aplicação do Teorema de Pitágoras, as equações são deduzidas, permitindo uma posterior análise quantitativa.

Hellstrand e Ott (1995), trabalhando com estudantes do Ensino Médio, compararam as respostas dos alunos de duas turmas distintas a um questionário que continha algumas conseqüências da relatividade. Estas duas turmas tiveram a mesma abordagem de ensino em sala de aula, porém, aos alunos de uma delas, foi recomendada a leitura do romance *O tempo e o espaço do Tio Alberto* (STANNARD, 1989). Neste livro, Gedanken, sobrinha do tio Alberto (Einstein), precisa fazer um trabalho escolar para a disciplina de ciências e pede um auxílio ao seu tio. As conseqüências da dilatação temporal e contração do espaço, assim como a velocidade da luz como limite, são exploradas de uma maneira muito divertida e com extrema coerência com a teoria. Os alunos da turma que haviam lido o romance apresentaram respostas consideravelmente melhores em relação às da turma de controle. Ficou evidente a proficiência da alternativa de utilização de textos de ficção científica, para o aprendizado dos conceitos.

Villani e Arruda (1996) defendem a analogia entre o processo histórico da construção da teoria da relatividade e o de aprendizagem da mesma. Os mesmos

¹¹ A experiência pensada consiste na emissão de luz por uma lâmpada localizada no centro de um vagão de um trem, em todas as direções. É suposto que as portas da frente e as de trás contêm sensores fotoelétricos que serão acionados, fazendo-as abrir, quando a luz atingi-los. Em virtude do movimento do trem, conclui-se que as portas abririam simultaneamente para um observador localizado no interior do trem, mas não para um outro localizado fora do mesmo e em repouso em relação ao solo.

acreditam que esta opção pode contribuir para um aumento da plausibilidade da teoria para os estudantes. Segundo os autores, uma primeira contribuição específica da História da Relatividade à melhoria do ensino vem dos principais elementos que deram sustentação à mesma em 1905, a saber:

(a) o eletromagnetismo de Maxwell-Hertz, cuja essência era a propagação da luz com velocidade constante em todas as direções;

(b) os resultados das experiências que questionavam a teoria clássica, como o de Michelson e Morley em 1887 com o interferômetro;

(c) as anomalias teóricas, como a assimetria ímã-condutor ou a divergência entre Eletromagnetismo e Mecânica;

(d) a compatibilidade entre a nova teoria da medição proposta pela Relatividade Especial e a filosofia de Mach, que criticava os postulados da Mecânica;

(e) a compatibilidade entre a TRE e a teoria do quantum de luz, considerada por Einstein como bem fundamentada e plausível e, posteriormente, desenvolvida no contexto da Mecânica Quântica (VILLANI e ARRUDA, 1996, p. 43).

Para aplicar essa proposta, é necessário que os estudantes tenham um conhecimento prévio do eletromagnetismo. Dessa forma, a adaptação da mesma aos alunos do primeiro ano do Ensino Médio fica dificultada nos moldes curriculares atuais, uma vez que os conceitos do eletromagnetismo são vistos apenas no terceiro ano. Entretanto, acreditamos que a contextualização histórica possa ser adaptada e realizada mesmo com estudantes do início do Ensino Médio.

Müller (2000) apresenta uma interessante alternativa didática fundamentada no confronto da teoria da relatividade de Einstein com as que defendiam a existência do éter e a não-isotropia da velocidade da luz. O autor propõe uma seqüência que, partindo da descrição do funcionamento do sistema de posicionamento global (GPS), demonstra quantitativamente o erro que seria obtido na localização de um ponto da superfície terrestre, caso se admitisse que a velocidade da luz fosse influenciada pelo movimento da Terra. Um simples modelo unidimensional para a comparação entre as duas interpretações é delineado, deixando claro que, após uma discussão sobre adição

galileana de velocidades, esta alternativa pode ser aplicada com estudantes do Ensino Médio.

A proposta de Rodrigues (2001), além de ser explicitamente direcionada para o Ensino Médio, destaca-se por preconizar o ensino de alguns aspectos da relatividade durante todos os três anos e não apenas após o final do eletromagnetismo, em concordância com a proposição *sprinkle* de Resnick (1987). Rodrigues defende que:

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 à idéia de uma complementação dos conceitos físicos. Esse mesmo papel é assumido pelas leituras suplementares dos livros didáticos. [...] 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 (RODRIGUES, 2001, p. 132).

As inserções foram planejadas em três módulos, um para cada ano do Ensino Médio, de no máximo dez aulas cada. As cinco etapas a serem seguidas em cada módulo têm uma abordagem semelhante à proposta de Angotti *et al.* (1978) e são elencadas pelo autor como:

1ª etapa: É apresentado ao grande grupo um problema contextualizado historicamente.

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.

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.

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.

5ª etapa: A característica desta etapa é a abordagem de dois aspectos essenciais do fazer científico. [...] o caráter epistemológico, e por outro, o caráter histórico que ultrapassa os limites da ciência, rumo à sociedade. (RODRIGUES, 2001, p. 134 e 135).

Ainda sobre os conteúdos abordados em cada ano, o autor propõe que, para o primeiro ano, sejam tratadas as concepções de espaço e tempo relativísticas, partindo de discussões sobre o paradoxo dos gêmeos e da detecção dos múons na superfície terrestre. Para o segundo ano, o mesmo sugere questionar a necessidade da existência do éter para a teoria ondulatória e a grande resistência demonstrada pelos cientistas para abandoná-lo. E, finalmente, para o último ano do Ensino Médio, uma análise das inconsistências do princípio da relatividade quando aplicado ao eletromagnetismo. A proposta é muito interessante, porém, como não foi testada, não temos como analisar sua eficácia. Acreditamos também que os conceitos de massa e energia relativísticos poderiam ser abordados concomitantemente às suas formulações clássicas no primeiro ano, num momento posterior às concepções de tempo e espaço, que o princípio da equivalência, germe da relatividade geral, pode também ser trabalhado após a abordagem de forças fictícias em sistemas não inerciais, problemas normalmente constantes após o ensino da segunda lei de Newton, e que a interpretação do espaço curvo de Einstein, poderia ser abordada após o tratamento da gravitação universal de Newton.

Com o objetivo de investigar a concepção dos estudantes acerca do conceito de tempo da relatividade restrita, Sherr *et. al.* (2001) desenvolveram uma pesquisa com mais de 800 estudantes universitários que já haviam tido contato com esta teoria em ambiente formal de sala de aula. A metodologia da pesquisa consistiu em avaliar as respostas dos estudantes dadas a problemas que continham situações nas quais os mesmos deveriam aplicar os conceitos relativísticos de tempo, simultaneidade e sistemas de referência. Também foram conduzidas entrevistas com alunos dos mais variados cursos e níveis de graduação. O resultado obtido indicou que os estudantes apresentam sérias dificuldades em relação à compreensão da relatividade da

simultaneidade e do papel dos observadores localizados em sistemas inerciais de referência. Mesmo após o contato com a relatividade einsteiniana, os estudantes ainda recorriam a concepções newtonianas de tempo absoluto (SHERR *et. al.*, 2001, p.34). Neste trabalho, os autores catalogaram as principais dificuldades enfrentadas pelos alunos em relação aos conceitos de tempo, simultaneidade e sistemas de referência da Teoria da Relatividade Restrita para, posteriormente, propor metodologias alternativas de ensino a fim de combater essas deficiências de aprendizagem.

Em outro trabalho divulgado um ano depois (SHERR *et. al.*, 2002), os autores descrevem o desenvolvimento de *softwares* tutoriais, concebidos com o objetivo de promover uma maior interação dos alunos na construção dos conceitos de simultaneidade e sistemas de referência. Os estudantes que trabalharam com estes materiais instrucionais evidenciaram expressiva melhora em suas explicações quanto aos conceitos centrais da cinemática relativística. Os autores defendem que, para atingir uma aprendizagem significativa, os estudantes precisam participar ativamente da construção desses conceitos e enfrentar, individualmente, os processos de conflito e resolução dos clássicos paradoxos da relatividade (SHERR *et. al.*, 2002, p. 1247).

Gomes, Coimbra e Lindino (2005) conceberam e testaram uma intervenção de ensino de Relatividade Restrita através da análise das pré-concepções dos alunos de um curso de Licenciatura em Física acerca dos conceitos de tempo, espaço e velocidade. Um dos objetivos deste trabalho foi identificar se a interpretação destes conceitos pela Mecânica Newtoniana influenciaria o aprendizado da Teoria da Relatividade, uma vez que ambas propõem formulações diferentes para os mesmos. Utilizando como referencial metodológico os três momentos pedagógicos (DELIZOICOV e ANGOTTI, 1991), a proposta adotou várias estratégias como a exposição de filmes didáticos, a apresentação de seminários pelos alunos e discussões, mediadas pelo professor, sobre

situações-problema para as quais as explicações fundamentadas na física clássica se mostravam insuficientes.

Após estas atividades, foi aplicado um pós-teste, com o intuito de verificar, ou não, a mudança conceitual. Os resultados mostraram a assimilação das bases das discussões, uma vez que alguns conceitos presentes no pré-teste, como o de tempo absoluto e a transformação galileana de velocidades, foram significativamente alterados nas respostas dadas às questões do pós-teste. Nas respostas obtidas, os autores constataram indicativos da consciência dos alunos em relação ao processo de transformação das idéias, em curso (GOMES, COIMBRA e LINDINO, 2005).

Acreditamos que a análise desta intervenção é bastante profícua, principalmente porque a mesma parte das pré-concepções dos alunos em relação aos conceitos de tempo e espaço, conceitos estes que estamos interessados em analisar em nosso trabalho. Outro aspecto a ser destacado é que esta proposta se destina a professores iniciantes de Física, podendo estes futuramente atuarem como multiplicadores das proposições conceituais e metodológicas adotadas. Se objetivamos uma mudança na forma e nos conteúdos a serem trabalhados no ensino desta ciência, essas iniciativas concorrem significativamente para a preparação dos futuros mestres.

Durante nossas aulas, experiências realizadas em laboratório de partículas, em aviões supersônicos, em foguetes espaciais, entre outras, foram apresentadas aos alunos para que formulassem suas explicações, de acordo com a metodologia proposta por Angotti *et al.* (1978) e a alternativa didática defendida por Hall (1978). Noções sobre o processo histórico da construção da relatividade foram abordadas em sala seguindo a metodologia sugerida por Villani e Arruda (1996). De acordo com Hellstrand e Ott (1995), textos de ficção científica foram utilizados ao longo do processo como uma maneira lúdica de ensino. Por fim, como forma de verificar a evolução conceitual

promovida pela intervenção, aplicamos um pós-teste, contendo situações-problema, envolvendo alguns conceitos trabalhados no módulo, como relatividade do tempo e constância da velocidade da luz, para verificar a incidência de argumentos relativísticos nas respostas na mesma linha de Gomes, Coimbra e Lindino (2005). O Quadro 1 apresenta uma síntese das propostas para o ensino da relatividade descritas anteriormente.

Quadro 1. Resumo de propostas/alternativas didáticas para o ensino da relatividade.

PROPOSTA	ASPECTOS PRINCIPAIS
Angotti <i>et al.</i> (1978)	Mudança de atitude (participação ativa) – Problematização dos conceitos – Desobriga-se da seqüência histórica.
Hall (1978)	Experiência de Hafele-Keating para apresentar a dilatação temporal.
Rosser (1979)	Ensino da relatividade em função de evidências experimentais e precisão de medidas.
Ryder (1987)	Inconsistências da Mecânica Clássica, justificando a inserção de uma nova teoria.
Daly e Horton (1994)	Experiência de pensamento para deduzir a dilatação temporal e a contração do comprimento com a matemática disponível no Ensino Médio.
Hellstrand e Ott (1995)	Utilização de texto de ficção científica no ensino da Teoria da Relatividade.
Villani e Arruda (1996)	Análise histórico-crítica – Reconstrução das etapas históricas do desenvolvimento da teoria.
Muller (2000)	Compreensão do funcionamento do GPS e análise de erro de posicionamento em função do vento de éter.
Sherr <i>et al.</i> (2001/2002)	Levantamento das dificuldades para a compreensão do conceito de tempo da relatividade e proposta de participação ativa dos alunos na construção de conceitos.
Rodrigues (2001)	Pulverização dos conceitos nos três anos do Ensino Médio – Tempo e espaço relativísticos para o primeiro ano.
Gomes, Coimbra e Lindino (2005)	Concepções de tempo – análise metacognitiva.

No próximo capítulo, detalhamos os aspectos metodológicos de nossa pesquisa descrevendo e fundamentando as estratégias utilizadas em nossa seqüência didática.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Pesquisas Qualitativas em Educação – Estudo de Caso

A complexidade do fenômeno educacional leva à reflexão sobre as metodologias de pesquisa mais adequadas para descrevê-lo. Durante muito tempo, almejou-se decompor os fenômenos educacionais em suas variáveis básicas, analisando-as isoladamente, como no estudo de fenômenos físicos, para compreendê-los de maneira integral. Acreditava-se que estudos analíticos e, se possível, quantitativos, além de enfocar esses fenômenos consolidados em premissas de neutralidade e independência, seriam necessários e suficientes para as pesquisas neste ramo. Entretanto, Lüdke e André (1986) apontam que, com o desenvolvimento das pesquisas em educação,

foi-se percebendo que poucos fenômenos nessa área podem ser submetidos a esse tipo de abordagem analítica, pois em educação as coisas acontecem de maneira tão inextricável que fica difícil isolar as variáveis envolvidas e mais ainda apontar claramente quais são as responsáveis por determinado efeito (LÜDKE e ANDRÉ, 1986, p. 3)

Frente ao desafio de captar essa realidade dinâmica e complexa, as autoras defendem as abordagens qualitativas de pesquisa enquanto alternativas mais convenientes para a análise dos fenômenos educacionais. Ao contrário da perspectiva de realização de pesquisas por pessoas que não estejam envolvidas com o processo, situadas acima da esfera de atividades comuns, as pesquisas educacionais podem e devem ser realizadas dentro das atividades normais do profissional da educação, tornando-as um instrumento de enriquecimento do próprio trabalho. Segundo Bogdan e Biklen (*apud* Lüdke e André, 1986), as pesquisas qualitativas possuem como características principais:

- Adotar o ambiente natural como fonte de dados e promover um contato mais direto e prolongado do pesquisador com o mesmo;

- Utilizar uma diversidade de dados descritivos como relatos de entrevistas, citações, condições do ambiente, fotografias, entre outros, com o objetivo de caracterizar a situação da maneira mais completa possível;
- Centrar o foco mais no processo do que no produto;
- Buscar compreender o ponto de vista dos participantes do estudo;
- Analisar os dados de uma maneira dedutiva.

Assim, diferentemente das pesquisas tradicionais, a pesquisa em educação não deve preconizar a comprovação de hipóteses definidas previamente. As autoras destacam que

O fato de não existirem hipóteses ou questões específicas formuladas *a priori* não implica a inexistência de um quadro teórico que oriente a coleta e a análise dos dados. O desenvolvimento do estudo aproxima-se a um funil: no início há questões ou focos de interesse muito amplos, que no final se tornam mais diretos e específicos. O pesquisador vai precisando melhor esse foco à medida que o estudo se desenvolve (LÜDKE e ANDRÉ, 1986, p. 13).

Ainda, segundo Villani e Pacca (2001)

Às vezes o pesquisador está consciente de que o trabalho não está definido e, provavelmente, irá se desenrolar de maneira diferente do apresentado; ou seja, ele sabe que as perguntas certas irão aparecer somente após um certo tempo e um grande esforço [...] Uma boa dose de ambigüidade nos detalhes específicos e de articulação na apresentação geral pode permitir que, no final do trabalho, o pesquisador possa conseguir, de algum modo inteligente, ligar aquilo que foi produzido com aquilo que foi apresentado no projeto formal e satisfazer as exigências da instituição que o aprovou (VILLANI e PACCA, 2001, p. 1).

Nessa perspectiva, optamos por realizar um estudo analítico-descritivo, desenvolvido sob os parâmetros de uma metodologia qualitativa de pesquisa, que se processou em dois momentos principais: um estudo inicial (exploratório), no qual elaboramos e aplicamos uma seqüência didática para abordar conceitos da Teoria da Relatividade Restrita; e, decorrente dos resultados obtidos, um estudo final, no qual

procuramos aprimorar a metodologia e efetuar uma coleta de dados mais sistemática, de acordo com as etapas de um estudo de caso¹². Segundo Nisbet e Watt (*apud* LÜDKE e ANDRÉ, 1986), esse estudo pode ser dividido em três etapas, as quais se sobrepõem no decorrer do processo. Na primeira, denominada fase exploratória, as questões de pesquisa são delimitadas e reformuladas à medida que o pesquisador entra em contato com a literatura específica, analisa documentos relacionados ao fenômeno a ser estudado, efetua observações e tomada de dados do mesmo, entra em contato com especialistas na área ou, ainda, quando reflete sobre a sua própria prática educacional e de pesquisa. Esta fase permeia todo o processo, porém, é crucial num primeiro momento para o recorte da situação a ser estudada e se faz necessária para que os esforços da pesquisa se destinem a um objetivo específico, a fim de apresentar resultados consistentes. Partindo dessa análise preliminar, a próxima etapa consiste numa delimitação do estudo em si, relacionando os aspectos mais relevantes e definindo o objeto a ser analisado especificamente. Em seguida, o pesquisador efetua a coleta metódica de dados, utilizando instrumentos mais estruturados e técnicas mais confiáveis, sempre visando atender às características próprias do objeto previamente definido. Por fim, a terceira etapa consiste na análise sistemática dos dados e na elaboração de um relatório contendo os principais resultados obtidos pela pesquisa.

Tendo em vista essas etapas, no estudo piloto dessa pesquisa, elaboramos uma seqüência didática e realizamos uma intervenção em sala de aula, a fim de testá-la e adequá-la, para uma turma de primeiro ano do Ensino Médio do turno matutino de uma escola da rede privada da cidade de Florianópolis, SC. O objetivo desta intervenção foi identificar minuciosamente as variáveis de nosso problema em questão, assim como

¹² Segundo Lüdke e André (1986), o estudo de caso consiste em analisar profundamente um caso bem delimitado e representativo de uma unidade, dentro de um sistema mais amplo. Conforme citado anteriormente, apesar do pesquisador partir de alguns pressupostos teóricos, outras variáveis, aspectos e elementos, importantes para a sua pesquisa, afloram à medida que o estudo vai se desenvolvendo.

suas inter-relações, em conformidade com a fase exploratória da realização de um estudo de caso. Posteriormente, após a análise dos aspectos positivos e negativos desta intervenção, reelaboramos a seqüência didática a fim de corrigir as falhas detectadas e redirecionar as estratégias. A segunda aplicação foi feita em uma turma do primeiro ano do Ensino Médio do turno noturno de uma escola pública da rede estadual, na cidade de Florianópolis, SC. Nesta, os dados foram sistematicamente registrados através de gravação em vídeo.

Nos dois momentos da investigação, o pesquisador atuou também como professor, caracterizando, em relação ao método de observação utilizado para coleta de dados, a observação participante. Segundo Lüdke e André (1986), nesta modalidade de observação, os objetivos e o papel da observação são revelados ao grupo desde o início do processo para que o observador possa ter acesso a mais informações e contar com a colaboração do grupo. Para Bardin (1999), a observação participante torna-se fundamental quando o observador coleta dados através de sua participação constante no cotidiano do grupo estudado. Ele observa todo o grupo e identifica situações com as quais os mesmos se deparam e como se comportam diante delas. Divide informações e estrutura os diálogos inerentes, descobrindo suas interpretações próprias sobre os acontecimentos vivenciados por meio do projeto aplicado.

Na próxima seção, detalhamos a elaboração da intervenção piloto, apresentamos a análise dos resultados obtidos na mesma e relatamos os aspectos que foram essenciais para a reestruturação da seqüência.

3.2 A Intervenção Piloto

A seqüência didática foi aplicada pelo próprio pesquisador em uma turma do primeiro ano do Ensino Médio, com vinte e dois alunos de idades entre quatorze e dezesseis anos, pertencentes a uma escola particular, localizada em um bairro de classe média alta na cidade de Florianópolis, SC. A escolha desta escola se deu pela abertura da equipe diretiva e pelo fato de o pesquisador ter a realidade do contexto escolar da instituição de ensino previamente caracterizada. Outra razão foi a constatação de que o Projeto Político Pedagógico da escola está de acordo com os interesses e com a metodologia da proposta elaborada.

Consultando o material didático utilizado e o professor da turma, verificamos que, até o momento, os alunos haviam tido contato com os conceitos iniciais da Cinemática Clássica. Através de conversas informais com alguns professores e com a orientadora educacional da escola, levantamos as características gerais da turma, como o envolvimento e desempenho dos alunos, não só em Física. Aplicamos um total de dez aulas, divididas em cinco encontros de duas aulas seqüenciais, mais outros dois encontros destinados à aplicação dos questionários (pré e pós-testes). As aulas foram gravadas em áudio com o consentimento dos responsáveis pelos alunos. Constatamos a inadequação dessa forma de registro. Detalhamos a nossa seqüência didática a seguir, assim como apresentamos uma síntese dos resultados obtidos por meio da análise das respostas dadas pelos estudantes e de episódios de ensino¹³ recortados das gravações.

¹³ Segundo Carvalho, episódio de ensino é aquele momento em que fica evidente a situação que queremos investigar. Pode ser a aprendizagem de um conceito, a situação dos alunos levantando hipóteses num problema aberto, as falas dos alunos após uma pergunta desestruturadora, etc. Ele é parte do ensino, um recorte feito na aula, uma seqüência selecionada que se caracteriza por processos de busca da resposta do problema em questão. A característica fundamental é que seja um ciclo completo, no processo de interação entre sujeitos, mediado pelo objeto do conhecimento (CARVALHO, 2000, p. 73).

3.2.1 A Seqüência Didática

Num primeiro momento, procuramos identificar as pré-concepções dos estudantes acerca de conceitos que abordaríamos, de acordo com a aceção de que a análise das idéias prévias dos estudantes é fundamental para o processo de ensino. Esses conceitos (tempo, simultaneidade, relatividade galileana e finitude da velocidade da luz) foram escolhidos por serem considerados essenciais para o ensino da relatividade, além de previstos, habitualmente, no currículo do primeiro ano do Ensino Médio. Este levantamento, realizado via instrumento (pré-teste) constante no Anexo 1, foi elaborado pelo pesquisador e contém sete questões nas quais, além da preocupação em se abordar situações problemáticas semi-abertas, algumas questões foram concebidas para averiguar a coerência interna entre as respostas dadas.

Extraímos, deste levantamento, as principais pré-concepções dos estudantes, entendidas aqui como as concepções prévias que os mesmos apresentam sobre o assunto em estudo, tendo em vista que há um padrão aproximadamente constante das mesmas em relação a cada determinado conceito ou idéia científica. Dessa forma, a primeira questão do pré-teste foi formulada através da apresentação de diversas frases do cotidiano nas quais aparecia a palavra tempo. Foi solicitado ao estudante que escolhesse a(s) frase(s) que estava(m) mais relacionada(s) com a sua idéia de tempo e que justificasse esta escolha. Cada uma das frases estava associada a uma diferente noção de tempo, o que, juntamente com as respostas dadas às duas questões subseqüentes, nos permitiu categorizar as concepções dos estudantes acerca deste conceito.

As categorias, mapeadas para a análise destas concepções prévias, foram adaptadas dos trabalhos constantes na literatura específica. Um desses trabalhos é o de Martins (2004), no qual o autor traça o perfil epistemológico bachelardiano para o conceito de tempo, propondo para as zonas do perfil: *i*) realismo ingênuo: engloba as

percepções psicológica, subjetiva e animista; o tempo é heterogêneo, qualitativo e está relacionado à coordenação de movimentos com velocidades diferentes; da perspectiva ontológica, a presença de um contador é premente nesta fase. *ii)* empirismo: o tempo é métrico, linear, contínuo e homogêneo; sua relação com o conceito de velocidade reside na constância da mesma para os relógios. *iii)* racionalismo tradicional: o tempo apresenta o *status* de parâmetro matemático abstrato, sendo diferenciado de sua medida; o conceito de velocidade é do mesmo derivado; ontologicamente, neste perfil, o tempo é concebido como absoluto, adquirindo existência em si. *iv)* surracionalismo: nesta região, o tempo passa a ser relativo, ou seja, dependente do estado de movimento do referencial; a medida do tempo é subordinada à velocidade relativa e a simultaneidade de dois eventos torna-se, também, relativa; da perspectiva ontológica, compõe, em pé de igualdade e simetria com o espaço, um espaço matemático quadridimensional; inclui, ainda, a questão da flecha do tempo e da irreversibilidade de processos termodinâmicos (MARTINS, 2004, p. 106 – 109).

Há uma discrepância patente em se fundir num mesmo perfil o tempo relativístico e o termodinâmico, principalmente do ponto de vista ontológico, uma vez que o primeiro é determinístico e o segundo leva em conta a natureza probabilística dos processos microscópicos que definem a irreversibilidade. Dessa forma, acreditamos que seria mais adequado preservar a estrutura proposta inicialmente por Bachelard, desdobrando o perfil surracionalista em racionalismo moderno e contemporâneo para acomodar no primeiro a definição relativística e no segundo a termodinâmica (KARAM, COIMBRA E SOUZA CRUZ, 2005).

Especificamente para a nossa análise, optamos por ampliar essa classificação ao percebermos, ao longo do processo, uma possibilidade maior de categorias para a concepção de tempo, antes e depois da intervenção, e por a considerarmos mais

adequada para as intenções de nossa pesquisa de acordo com a proposta de perfil conceitual de Mortimer (1994). Não tendo a pretensão de que essa classificação seja única, catalogamos:

- TP – Tempo Psicológico: noção da passagem do tempo dependente da situação e do sujeito. Realidade subjetiva.
- TC – Tempo Cronológico: tempo quantificado em unidades que se repetem periodicamente; horas, minutos e segundos medidas pelo relógio (empirismo). Independente de sensações, realidade objetiva.
- TN – Tempo Absoluto de Newton: o tempo flui homogênea e uniformemente de maneira independente do referencial e da matéria. A marcha inexorável do tempo.
- TQ – Tempo Discreto: noção da passagem do tempo em quadros, pressupondo um instante como indivisível.
- TD – Tempo Determinístico: noção de uma ordem pré-determinada e imutável.
- TI – Tempo e Probabilidade: incerteza, particularmente quanto ao futuro.
- TS – Tempo e Simultaneidade: relação entre o conceito de tempo e a noção de simultaneidade de eventos.
- TR – Tempo Relativo: engloba o conhecimento da dependência da medida do tempo em função do estado de movimento do referencial.

Assim, as frases contidas na primeira questão estavam relacionadas com os conceitos de tempo categorizados. Na segunda questão, um pequeno texto é apresentado para ilustrar a concepção operatória de tempo enquanto relação de sucessão e duração através de operações qualitativas em concordância com a proposta de Piaget (1946) e a terceira apresenta um outro texto, o qual associa a visão operacional métrica à

quantificação do tempo e sua medição através de relógios, além de procurar identificar a noção de simultaneidade. Estas duas questões permitem, além dos objetivos intrínsecos citados, a verificação da coerência entre as respostas das mesmas entre si e em relação à primeira, confirmando a categorização da concepção de tempo do estudante.

Na quarta questão, buscamos a concepção de finitude da velocidade da luz dos estudantes. Primeiramente, uma situação lhes foi proposta e os mesmos solicitados a explicá-la. No segundo item, é apresentado um debate entre dois amigos com opiniões diferentes em relação a um determinado fenômeno, e os alunos são convidados a optar por uma delas, de forma que sua noção sobre esse conceito ficasse evidente.

A quinta questão aborda determinadas situações físicas observadas por referenciais diferentes. O objetivo da mesma é constatar se os alunos possuem a noção de movimento relativo, bem como se os mesmos utilizam o princípio da relatividade de Galileu e a adição galileana de velocidades em suas respostas, uma vez que essas questões já haviam sido abordadas pelo professor da disciplina.

Para transitar em direção ao conhecimento sistematizado, via processo de continuidade e ruptura, contemplamos, na sexta questão, a problematização da detecção de múons na superfície terrestre, a qual oportuniza a instauração do conflito. Finalizando, a sétima objetivava constatar se o aluno associa uma interdependência entre espaço e tempo.

A aplicação deste questionário, no estudo piloto, possibilitou-nos avaliar sua eficácia quanto à identificação das pré-concepções dos estudantes e a pertinência das questões para a seqüência didática. Além disso, a análise das respostas dos alunos foi fundamental para que direcionássemos os tópicos que seriam abordados no módulo, fornecendo, assim, uma fundamentação para a discussão dos postulados e conseqüências da relatividade restrita. Na seqüência, descrevemos e justificamos as

atividades desenvolvidas em sala de aula, as quais foram divididas em cinco encontros de duas horas-aula cada.

1º Encontro: Discussão do Princípio da Relatividade de Galileu

Influenciados pelas respostas dos estudantes ao pré-teste que nos mostraram uma não-identificação do princípio da relatividade de Galileu, resultado bem conhecido na literatura específica (VILLANI e PACCA, 1990; PIETROCOLA e ZYLBERTSZTAJN, 1999), iniciamos por uma discussão mais detalhada sobre este princípio, uma vez que o mesmo é fundamental para a Teoria da Relatividade. Tendo em vista a adoção da proposta metodológica de Delizoicov e Angotti (1991), o primeiro momento pedagógico foi oportunizado pela instauração do conflito cognitivo através de uma situação hipotética. Foi solicitado aos alunos que imaginassem uma pessoa em pé no interior da carroceria de um caminhão segurando um telefone celular. Supondo que o caminhão estivesse se deslocando com velocidade constante, e que a pessoa deixasse o celular cair, perguntamos aos estudantes como a queda do aparelho seria vista por esta pessoa. Os alunos manifestaram suas opiniões e o professor, sem fornecer nenhuma resposta, mediu a discussão. Posteriormente, realizamos uma experiência análoga à situação proposta, abandonando um pedaço de papel molhado de um *skate* em movimento oportunizando a instauração do conflito cognitivo.

Em relação ao segundo momento pedagógico, o afastamento crítico foi concretizado através do debate, conduzido pelo professor, sobre o texto *Em absoluto!* (GOLDSMITH, 2002, p. 22-35, Anexo 2), o qual discute o princípio da relatividade de Galileu de uma maneira lúdica e com uma linguagem extremamente apropriada para a faixa etária. Essa opção inspirou-se na sugestão de Hellstrand e Ott (1995) de utilização de textos paradidáticos no ensino da relatividade.

Por fim, um breve histórico dos sistemas Heliocêntrico e Geocêntrico foi abordado com o objetivo de aplicação do conhecimento. Discutimos o argumento dos defensores do geocentrismo que justificavam a imobilidade da Terra pelo fato de que objetos abandonados do alto de uma torre, por exemplo, caírem exatamente na sua base. Concluímos que nenhuma das interpretações está totalmente errada e que a opção por um dos dois sistemas é apenas uma questão de referencial.

As atividades realizadas pelos alunos, além da resolução da situação-problema em conjunto e defesa de seus posicionamentos ante aos demais, consistiram na leitura do texto e pesquisa extra-classe acerca do histórico da medição do tempo (manufatura de relógios), para apresentação na aula seguinte.

2º Encontro: Discussão sobre Concepções de Tempo

Estas aulas foram destinadas a uma abordagem histórico-filosófica do conceito de tempo e das diversas maneiras de medi-lo. Tradicionalmente, o ensino de Física não aborda uma discussão mais profunda sobre esse conceito. No Ensino Médio, o mesmo aparece no início da Mecânica Clássica, desempenhando um papel fundamental para o estudo da Cinemática. O movimento translacional é descrito como uma variação da posição ao longo do tempo. Analogamente à noção de ponto para a geometria euclidiana, o tempo é apresentado como um conceito primitivo; sendo assim, sem nenhuma reflexão sobre seus aspectos, ele passa a ser utilizado como parâmetro para as equações do movimento, e medido pelo relógio (KARAM, COIMBRA e SOUZA CRUZ, 2005).

Paradoxalmente, estudos sobre o desenvolvimento deste conceito ao longo da história da ciência evidenciam uma crescente importância dada ao tempo na evolução das teorias físicas (MARTINS e ZANETIC, 2001). Assim, como um de nossos

objetivos é promover uma ampliação no perfil conceitual de tempo, pela incorporação da noção relativística, é imperativo destinar uma discussão mais ampla sobre o conceito.

Inicialmente, analisamos, numa perspectiva interdisciplinar, a música “Semana que Vem” (Anexo 3), provocando um debate sobre as noções de tempo contidas na mesma. Na seqüência, os alunos apresentaram os trabalhos solicitados na aula anterior e, posteriormente, assistiram a trechos previamente selecionados do vídeo *Tempo: O Eterno Movimento*, do Discovery Channel. Esse vídeo faz um histórico da noção de tempo, comentando a evolução dos relógios que se tornam cada vez mais precisos e a preocupação com a marcação da passagem do tempo em nossa sociedade. A opção por essa atividade firmou-se na perspectiva de Rosa (2000), segundo a qual

A obra audiovisual é uma produção cultural, no sentido em que há uma codificação da realidade, na qual são utilizados símbolos fornecidos pela cultura e partilhados por um grupo de pessoas que produz a obra e pelas pessoas para as quais as obras se destinam (ROSA, 2000, p. 36).

A utilização do vídeo, nessa aula, teve como objetivo realizar uma síntese das noções de tempo em uma abordagem histórica. Uma discussão sobre os aspectos mais relevantes, como a diferença entre tempo e medida de tempo, a necessidade humana de medir tempo, a evolução dos processos de medida de tempo e a noção subjetiva de passagem de tempo, foi conduzida pelo professor com o objetivo de fazer aflorar as idéias dos estudantes em relação a este conceito.

3º Encontro: Desestruturação das Idéias Clássicas

Neste, sistematizamos alguns itens abordados na aula anterior, através da leitura de um fragmento do artigo de Andrewes (2002, p. 96-97, Anexo 4), que relata os avanços obtidos na precisão das medidas do tempo, dos relógios de pêndulo até os atômicos.

Focamos o tratamento quantitativo da concepção operatória métrica de tempo: sistema de base sexagesimal, precisão de medidas, destacando a precisão atingida por um relógio atômico.

Uma comparação de velocidades de corpos materiais com a velocidade da luz foi apresentada, na forma de quadro resumo, para que os estudantes pudessem perceber a magnitude da velocidade da luz quando comparada com velocidades cotidianas.

Seguindo a linha da proposta de Angotti *et al.* (1978), problematizamos os limites da mecânica clássica para altas velocidades por meio da exposição do atraso medido em relógios atômicos a bordo de aviões comerciais (Experiência de Hafele-Keating), assim como a retomada do problema da detecção do múon, constante no pré-teste. Essas situações foram apresentadas para os alunos que foram convidados a darem explicações para as mesmas. Foi apresentada também a experiência pensada de Einstein, na qual ele se imagina se deslocando à velocidade da luz ao lado de um raio luminoso e segurando um espelho.

4º Encontro: Experimento de Michelson-Morley

Inicialmente, solicitamos aos estudantes uma síntese metacognitiva escrita envolvendo os conteúdos trabalhados até aquele momento. Foi pedido que o aluno relatasse, por escrito, suas percepções acerca das atividades desenvolvidas e da contribuição das mesmas para a sua própria compreensão dos conceitos.

Após isso, com o objetivo de realizar uma contextualização histórica do surgimento da relatividade, iniciamos a discussão de uma situação análoga à experiência de Michelson-Morley, envolvendo a travessia de um rio por barcos em trajetórias perpendiculares, segundo a proposta de Peduzzi (1998). A explicação dos resultados esperados na diferença no tempo gasto foi demonstrada via aplicação do teorema de Pitágoras. Em seguida, explicamos sinteticamente o funcionamento do interferômetro

de Michelson e do objetivo da experiência de Michelson-Morley, clarificando a analogia com a situação dos barcos. Foi abordado também o fenômeno da interferência de ondas, diferenciando interferências construtivas e destrutivas através de exemplos, visando um entendimento adequado do funcionamento do interferômetro.

Por fim, exibimos trechos de um vídeo do experimento de Michelson-Morley da série *O Universo Mecânico*, do Instituto de Tecnologia da Califórnia¹⁴. Discutimos os objetivos da experiência e as implicações do seu insucesso. Neste caso, a utilização do vídeo teve a função de representar a experiência por animações.

No final da aula, os alunos receberam o texto *Beto conquista o tempo* (GOLDSMITH, 2002, p. 35-46, Anexo 5), e foi solicitado que os mesmos o lessem para a aula seguinte (HELLSTRAND e OTT, 1995).

5º Encontro: Postulados e Conseqüências

As aulas anteriores subsidiaram a abordagem feita neste momento da intervenção. Uma leitura, seguida de debate, de pontos-chave do texto lido pelos alunos, foi realizada pelo professor. Na seqüência, a exposição centrou-se nos postulados da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. O afastamento crítico, para estruturação e construção da teoria, foi implementado e procedeu-se à análise das conseqüências da dilatação do tempo (Terceiro Momento Pedagógico).

A experiência de pensamento sugerida por Daly e Horton (1994) e descrita na Seção 2.3 foi apresentada e discutida com os alunos, propiciando um tratamento qualitativo da dilatação temporal, bem como a dedução da sua expressão matemática. Também realizamos um tratamento quantitativo, variando os valores da velocidade de uma nave e calculando o fator gama. Finalizamos aplicando essa expressão a um problema semelhante ao conhecido como paradoxo dos gêmeos.

¹⁴ Gravação obtida da exibição da Rede Cultura de Televisão.

Com o intuito de analisar as possíveis alterações nas concepções dos alunos promovidas pela intervenção e de detectar as falhas ocorridas no processo, aplicamos um pós-teste (Anexo 6) contendo seis questões. A primeira questão buscava verificar se os alunos utilizariam o princípio da relatividade de Galileu na explicação de uma situação-problema envolvendo a queda de um corpo no interior de um ônibus. Nesse mesmo sentido, a questão seguinte solicitava que os estudantes determinassem a velocidade de um raio de luz quando observado por diferentes observadores, com o intuito de identificar o grau de assimilação do segundo postulado da Teoria da Relatividade Restrita. A terceira questão pedia que os alunos explicassem, sinteticamente, o objetivo e o funcionamento da experiência de Michelson-Morley. As duas questões subseqüentes pretendiam examinar se os estudantes relacionariam a relatividade do tempo a referenciais se movendo com velocidades diferentes. Através de uma questão de natureza metacognitiva, no último item do pós-teste, os alunos externariam se a intervenção provocou alguma mudança nas suas concepções prévias em relação ao conceito de tempo e, além de oportunizar, ainda, sugestões.

Apresentamos resumidamente, a seguir, os principais resultados obtidos neste estudo exploratório e descrevemos como esses resultados nos possibilitaram um outro olhar sobre o problema acarretando em um redirecionamento dos procedimentos metodológicos utilizados na segunda intervenção.

3.2.2 Resultados: Categorias de Análise e Fatores Potenciais para a Reestruturação

A análise dos dados obtidos pelas respostas dos alunos aos questionários possibilitou a catalogação das categorias apresentadas anteriormente. Na seqüência, examinamos as respostas dos alunos ao pré e ao pós-teste, descrevemos alguns episódios selecionados e indicamos a relevância dos resultados para a reestruturação da proposta.

O Quadro 2 foi organizado de modo a relacionar as pré-concepções de tempo predominantes da amostra contemplada, levantadas no pré-teste.

Quadro 2. Pré-concepções levantadas no pré-teste. A primeira linha representa as categorias conforme listadas na seção anterior, e a primeira coluna, os alunos participantes, discriminados por A1, A2, ... A22.

	TP	TC	TN	TQ	TD	TI	TS	TR
A1			■				■	■
A2	■	■						
A4	■	■					■	■
A5			■					
A6		■	■				■	■
A7	■	■	■					
A8		■	■				■	■
A9	■		■				■	■
A10		■						
A11		■			■		■	■
A12			■					
A13			■					
A14			■					
A16	■						■	■
A17		■				■	■	■
A18				■	■		■	■
A19		■					■	■
A20			■					
A21						■		
A22			■					

Essa categorização se deu através de uma análise da primeira questão e posterior confirmação da concepção nas respostas dadas às duas questões subseqüentes. As afirmações apresentadas constituem exemplos de falas explicitadas:

A16: [...] nós sempre falamos em tempo quando queremos que ele passe mais rápido ou devagar (TP).

A17: [...] o tempo para mim está mais relacionado com as horas (TC).

A19: Vejo o tempo como minutos, segundos, milésimos, horas e por aí vai, essa é a noção que eu tenho do tempo. Tempo para mim é uma “medida” (sic) de quanto demoramos para fazer algo, quanto demora para algo acontecer. Tempo são os dias, os anos, as semanas... (TC).

A5: [...] eu acho que o tempo passa, que nós não podemos parar o tempo, não temos como impedi-lo de passar (TN).

A11: [...] para mim, tempo significa a nossa vida [...] Temos um tempo para viver, mas esse tempo de vida, um dia, vai acabar. [...] você fica sempre imaginando como será o futuro, o que o destino reserva a você (TD).

A18: Certo momento em que coisas acontecem pode ser ao mesmo tempo como as lâmpadas ou coisas distintas do tempo (TS).

Observamos, no Quadro 2, que onze estudantes apresentam uma noção próxima da concepção newtoniana de tempo, aqui identificada por suas características ontológicas. Para esses estudantes, o tempo aparece diferenciado de sua medida e, quando enquadrados em mais de uma categoria, podemos notar que elas não são mutuamente excludentes, da perspectiva epistemológica. Por outro lado, nove deles apresentam, ainda, noções primitivas como TP e TC, mostrando que o assunto precisa ser mais abordado. Os estudantes A3 e A15 não realizaram o pré-teste.

Em relação à noção de finitude da velocidade da luz, um total de quinze alunos (correspondente a 68%) demonstrou ter consciência de que a luz não se transmite instantaneamente, ou seja, leva um determinado tempo para se deslocar de um ponto a outro, possuindo uma velocidade finita. Essa afirmação pode ser evidenciada nas respostas dos alunos à questão 4 (vide Anexo 1) como a de A1: *A velocidade da luz é tão rápida que é quase instantânea, já a do som não é tão rápida [...] Uma prova de que a velocidade da luz não é instantânea é quando uma estrela explode; demora um certo tempo para ela desaparecer no céu* e de A8: *A velocidade da luz não é instantânea e nem infinita, mas é muito rápida, e mesmo assim existe uma diferença de tempo entre a explosão até a luz chegar. Assim como podemos ver estrelas que não existem mais.* Entretanto, outros se posicionam de modo contrário, parecendo não

estarem convencidos dessa finitude como A6 e A19: *Na minha opinião, a velocidade da luz deveria ser infinita, mas a Física já provou que a luz tem uma velocidade e [...] não tenho certeza do que eu realmente acho [...] o que Rafael fala faz sentido, nós realmente não temos como saber se o movimento da luz é instantâneo ou não, respectivamente.* Outros poucos, ainda, dão indícios de que crêem que a velocidade da luz seja infinita, como na afirmação de A7: *[...] as estrelas se apagam e todos que estão as observando vêem elas sumindo no mesmo tempo. Uma lanterna que é apagada é apagada para todos que a vêem.* A resposta de A7 evidencia, também, sua aceção do caráter absoluto da simultaneidade, figurando como mais um indício da categoria TN. Optamos por não dedicar um momento específico para trabalhar a noção de finitude da velocidade da luz, entretanto, em uma das aulas, avaliamos a magnitude dessa grandeza, através de um quadro comparativo.

Praticamente todos os alunos distinguem que um mesmo objeto pode estar em repouso em relação a um observador e em movimento em relação a outro (Questão 5, Anexo 1), enfatizando que esses conceitos só têm sentido quando se estabelece um referencial, como podemos notar na declaração de A2: *Para Rafael, a poltrona está em movimento e, para Fábio, está em repouso. Tudo depende do referencial.* A maioria dos estudantes comenta que essa diferença se dá pela alteração, ou não, da distância entre o objeto e o referencial com o passar do tempo, como pode ser constatado na manifestação de A19: *Para Rafael, a poltrona está em movimento, pois ela tem um certo deslocamento que cada vez aumenta mais em relação a Rafael; já para Fábio, a poltrona está em repouso, pois ela está a uma certa distância dele, mas essa distância nem aumenta nem diminui, ela é sempre a mesma, para Fábio a poltrona “não sai do lugar”* (sic). Isso sugere uma assimilação do conceito de referencial, abordado previamente nas aulas regulares.

Por outro lado, quando solicitados a representar a trajetória da queda de uma lâmpada no interior de um ônibus vista por dois observadores distintos (item 5.2, Anexo 1), a maioria dos alunos (cerca de 73%) não utilizou o princípio da relatividade de Galileu em suas respostas. Os estudantes afirmaram que a lâmpada fica para trás, enquanto o ônibus segue seu caminho e diversos desenhos esquemáticos ilustraram essa concepção. Esse resultado está de acordo com estudos que mostram que as concepções prévias dos educandos acerca do movimento dos corpos têm uma estreita analogia com as premissas da teoria desenvolvida por Aristóteles (BOEHA, 1990; LOMBARDI, 1999). As alegações explicitadas nas respostas dos estudantes podem estar associadas ao conceito aristotélico de movimento natural (sempre retilíneo em relação à Terra), à impossibilidade da existência do vácuo ou, ainda, à necessidade de força para o movimento violento (não-natural).

Apesar de aplicarem adequadamente a adição galileana de velocidades na questão 5.5, os alunos tiveram certa dificuldade em responder a mesma, uma vez que se tratava de uma situação aberta, cuja resolução permeava a formulação de hipóteses. Durante a aplicação do pré-teste, vários alunos questionaram se Fábio estaria se deslocando no mesmo sentido do ônibus, ou em sentido contrário. Apenas cinco alunos aventaram duas possibilidades para o sentido do movimento de Fábio e, em seguida, calcularam a velocidade do mesmo, em relação a Rafael, para ambos os casos. Isso denota que os estudantes estão habituados a avaliações contendo questões com situações fechadas, cujas condições já estejam pré-estabelecidas. Revela, ainda, que a formulação de hipóteses não é usual em seu cotidiano escolar.

Em função dos resultados obtidos no pré-teste, começamos pela análise da Relatividade de Galileu, como elemento chave para a formulação do princípio de relatividade, fundamental para a discussão posterior do primeiro postulado de Einstein

da Teoria da Relatividade Restrita. Transcrevemos, na seqüência, o primeiro episódio de ensino analisado, recortado do primeiro encontro, no qual o professor propõe uma situação aberta e medeia um debate entre os alunos. Em função da qualidade insatisfatória da gravação em áudio, foram transcritos apenas as partes inteligíveis das falas e esses dados foram entremeados com as anotações do professor.

Episódio 1 – Princípio da Relatividade – fragmento do 1º Encontro

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *Suponham que eu estou de pé em cima de uma carroceria de um caminhão, falando ao celular. (Para facilitar a visualização, o professor desenhou a situação no quadro). Agora, vamos considerar que este caminhão esteja se deslocando em linha reta, em uma estrada perfeitamente lisa e horizontal e que sua velocidade permaneça constante durante o movimento. [...] imaginem que, por um descuido qualquer, eu deixo cair o celular da minha mão. Como é que eu vejo esta queda? Onde irá cair meu celular?*

A18: *Ele irá cair atrás de você professor.*

P: *Por que você acha isto?*

A18: *Porque você está na velocidade do caminhão e continua andando com ele, já o celular não.*

A20: *Na verdade ele cai reto, mas como o caminhão está andando, você o verá caindo atrás de ti.*

P: *Todos concordam com as opiniões do A18 e A20?*

Confusão de vozes.

A7: *Eu acho que depende do referencial.*

P: *Como assim?*

A7: *Acho que para quem está vendo de fora, o celular cai reto, mas para você que está dentro, ele cai para trás.*

P: *Mas ele vai atingir o chão em um determinado ponto, certo? Você acha que este ponto depende do referencial?*

A7: *É professor, daí eu não sei.*

[...]

P: *Suponham agora que eu coloque uma mesa de pingue-pongue nesta carroceria e chamo o professor de Biologia para jogar comigo. Lembrando que o caminhão está em MRU, teríamos algum problema para jogar uma partida?*

A8: *E a resistência do ar? Com certeza ela atrapalharia, certo?*

P: *Muito bem lembrado, você tem toda razão. O ar atrapalharia bastante o nosso jogo. Mas, nesta situação, vamos considerar desprezíveis os efeitos da resistência do ar. É como se não houvesse ar nenhum em torno do caminhão. Eu sei que não é uma situação real, mas facilitará nossas discussões. Vocês podem tentar imaginar isso? [...] Então, mesmo sem a resistência do ar haveria algum problema para jogarmos esta partida?*

A18: *Eu acho que quando um dos dois bater na bolinha, ela vai mais rápido e quando o outro bater ela vai mais devagar. Assim, não seria um jogo muito igual. Quem estivesse na parte da frente da carroceria teria vantagens sobre quem estivesse na parte de trás.*

Percebemos, nesse episódio, a implementação do primeiro momento pedagógico. O professor propõe uma situação sem fornecer nenhuma explicação e os estudantes vão manifestando suas concepções, semelhantes ao resultado obtido no pré-teste. Alguns estudantes pareciam discordar dos argumentos apresentados pelos colegas, mas, nesse primeiro momento, omitiram-se. A7, ao afirmar *Eu acho que depende do referencial*, apresenta uma resposta pronta (típica de avaliações tradicionais), sem evidenciar entendimento do seu significado quando solicitado. A8 identifica um importante fator relacionado com a situação e o professor se vê obrigado a reformulá-la.

Com o objetivo de promover um conflito, ainda no mesmo encontro, o professor realizou uma experiência em sala: em cima de um *skate* e em repouso em relação ao solo, o professor abandonou um pedaço de papel molhado e o mesmo caiu junto ao seu pé. Em seguida, ele repetiu a experiência com o *skate* em movimento. O pedaço de papel molhado caiu exatamente no mesmo ponto em relação ao *skate*. Descrevemos os posicionamentos dos estudantes no segundo episódio.

Episódio 2 – Experimento do *Skate* – fragmento do 1º Encontro

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

A7: *É que aqui na sala tem ar...*

P: *Verdade A7, mas nós podemos considerar desprezível o efeito da resistência do ar sobre a bola de papel molhado nessa situação.*

A18: *Mas a velocidade do caminhão é muito maior que a do skate professor.*

P: *Qual será a velocidade do skate A18? Você pode estimar um valor? Aproximadamente quantos metros ele percorre durante um segundo de movimento?*

Neste momento o professor deu mais um impulso no *skate* para os alunos pensarem.

A21: *Ah professor, acho que uns dois metros.*

P: *Certo, vamos considerar que sua velocidade seja de 2 m/s. Quanto tempo, aproximadamente, o papel leva para cair? Alguém tem um relógio para cronometrarmos?*

[...]

A7: *Foi muito rápido, menos de um segundo!*

P: *Então vamos considerar, para facilitar nossas contas, que o papel demorou meio segundo para cair, ok? Agora me diga, quantos metros o skate percorre em meio segundo?*

A7: *Um metro.*

P: *Então o papel deveria cair um metro atrás do meu pé, não é? Poxa, o skate deve ter uns 80 cm! Além do mais vocês viram que o papel caiu praticamente junto ao meu pé.*

A7: *É mesmo...*

P: *E se fosse dentro de um avião que tem uma velocidade de uns 900 km/h. De acordo com o que você está me dizendo, se soltássemos uma bolinha de gude no interior de um avião, a mesma se deslocaria para trás com uma velocidade de 900 km/h! Puxa vida, se essa bolinha atingisse alguém, provavelmente mataria!*

Risos.

A14: *A velocidade do skate não é uniforme.*

P: *Realmente, talvez ela diminua um pouco, mas durante a queda sua velocidade é praticamente constante. Vou andar de novo em cima do skate e peço que vocês reparem no barulho feito quando as rodas passam pelos azulejos. Se a frequência do som for constante, isso significa que a velocidade do mesmo também é.*

Depois de realizada a experiência por mais algumas vezes, o aluno concordou que a velocidade do skate não estava variando consideravelmente.

Os argumentos dos estudantes estão de acordo com o comportamento alfa previsto na Teoria de Piaget. A primeira atitude, frente a uma aparente perturbação, é rejeitá-la e buscar argumentos que expliquem os fatos observados baseados em suas estruturas cognitivas. O professor procura contra-argumentar, objetivando fazer com que os alunos percebam a impossibilidade de descartar a perturbação e propiciando que os mesmos atinjam a fase beta. A instauração de conflito sócio-cognitivo mostrou-se útil, pela exploração da coexistência da diversidade de opiniões. Ao procurar formular a argumentação junto a seus pares, oportunizamos aos estudantes averiguar suas hipóteses. A organização do conhecimento - segundo momento pedagógico - foi feita através da leitura de um texto pelos alunos. Discutiram-se os aspectos mais relevantes do texto sistematizando o princípio da relatividade, e outras situações foram analisadas, como a questão do Geocentrismo e do Heliocentrismo, propiciando a aplicação deste

princípio (terceiro momento pedagógico). A poucos instantes do final da aula, percebemos que alguns alunos ainda insistem em argumentos apriorísticos para preservar suas concepções prévias, como nas colocações de A13: *Tudo bem professor, mas e se você estivesse dentro de um navio que se desloca em MRU e algo caísse de um lugar bem alto como de uma torre de dez metros? Daí ele não cairia reto, não é?* ou de A20: *E se fosse algo bem leve, como uma bexiga dessas de aniversário, daí ela não cairia reto também, certo?* Na aprendizagem significativa, a estrutura teórica como um todo tem que se modificar. É pouco provável que isso ocorra em função de um único exemplo mal sucedido no meio de muitos outros que, até o momento, contribuíram mais para confirmar e construir a teoria espontânea, em conformidade com o apontado por Garrido (1996).

A primeira questão do pós-teste propõe uma situação para verificar a aplicação do princípio da relatividade de Galileu. Com exceção de um aluno, as respostas estavam de acordo com esse princípio (pacote caindo no ponto B, vide Anexo 6), o que nos permite aferir um resultado expressivo da atividade realizada no primeiro encontro, mesmo constituindo uma abordagem de Mecânica Clássica. Na seqüência, transcrevemos algumas respostas obtidas no pós-teste.

A1: O pacote sempre cairá no ponto B, pois as leis da natureza são as mesmas para um corpo em repouso em relação ao solo e para um corpo que estiver em MRU a qualquer velocidade. Por isso, não podemos ter certeza de quando estamos em certa velocidade ou estamos parados.

A19: a) O pacote cairá reto. b) e c) O pacote continuará caindo reto, pois não importa em que velocidade o ônibus está, eu posso estar em um avião a uns 900 km/h que se eu jogar um pacote ou qualquer outra coisa para cima, ele vai cair novamente na minha mão, independente da velocidade.

A18: No ponto B também, pois repouso e MRU não muda a posição, não dá diferença dentro do ônibus.

O sucesso da atividade motivou sua manutenção na intervenção posterior. Entretanto, constatamos que nosso instrumento foi incapaz de averiguar a assimilação do primeiro postulado (Princípio da Relatividade Einsteiniano), de modo que, na

segunda intervenção, reformulamos a questão do pós-teste, não enfatizando os fenômenos da Mecânica, para atingir este objetivo.

No terceiro episódio, analisamos a quantificação do tempo, subsidiando a discussão posterior sobre a necessidade da crescente precisão das medidas. A convenção das medidas foi abordada com os alunos. Alguns demonstraram acreditar que as unidades como metro, quilograma e segundo foram descobertas, e não convencionadas.

Episódio 3 – Medida de Tempo – fragmento do 3º encontro

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *O que é um segundo? O que é uma hora?*

A7: *Um período de tempo relacionado com um dia.*

P: *Certo, quantas horas têm em um dia?*

A3: *24h*

P: *Então, uma hora é a vigésima quarta parte de um dia, que é o tempo que a Terra leva para dar uma volta completa em torno de seu eixo devido ao seu movimento de rotação.*

A7: *Como é que eles **souberam** que um dia tinha 24 horas?*

Confusão de vozes.

P: *E daí, pessoal, como eles souberam?*

Longo silêncio.

P: *Na verdade, eles não “souberam” A7, isso é uma convenção. Eles poderiam ter dividido o dia em 30 partes iguais e a hora seria menor que a nossa, por exemplo. Hoje, em dia, porém, a definição de segundo é diferente. Um segundo é definido como o tempo necessário para que os elétrons do átomo de césio efetuem 9.192.631.770 oscilações completas. Um relógio atômico chega a ter a impressionante precisão de menos de um nanossegundo por dia.*

A18: ***Para que** tão preciso?*

P: *Boa pergunta A18. Para medir coisas do nosso dia-a-dia, estes relógios não têm utilidade nenhuma. Um relógio mecânico que atrase um décimo de segundo por dia será praticamente tão útil para você como um relógio atômico. Você não chegará atrasado na escola se tiver um relógio mecânico, certo? Porém, existem alguns fenômenos que ocorrem muito mais rapidamente do que podemos imaginar. Uma partícula criada em um laboratório, por exemplo, chega a viver apenas alguns microssegundos. O GPS, que vimos no vídeo da aula passada, precisa ter relógios de altíssima precisão para localizar um ponto, latitude, longitude e altitude, na superfície da Terra. Uma diferença na casa de microssegundos pode originar um erro de centenas de metros.*

Através da manifestação de A18 (grifo nosso), fica evidente que é significativa a não-compreensão da necessidade de tanta precisão, uma vez que, nos fenômenos vivenciados por ele cotidianamente, esses atrasos são imperceptíveis. Neste ponto, a réplica do professor oportuniza uma melhor compreensão da questão em função de sua aplicação, como na abordagem do exemplo do GPS. Apesar de, segundo Rodrigues (2001), essa compreensão não representar uma justificativa crucial para a inserção do ensino de relatividade em nível médio, análises, como a relatada, concorrem para sua efetividade, concordando com a sugestão didática proposta por Müller (2000).

Até então, as atividades anteriores visavam familiarizar os estudantes com as tecnologias atuais de medida de tempo e o funcionamento de relógios, particularmente o atômico. Nesta perspectiva, fatos experimentais, como o atraso medido em relógios atômicos (Experiência de Hafele-Keating) e a detecção de múons na superfície terrestre, são apresentados e os alunos são convidados a darem explicações para os mesmos.

Episódio 4 – Problematização da Relatividade do Tempo – fragmento do 3º encontro

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *O relógio que deu uma volta na Terra dentro de um avião, quando voltou, estava 275 nanossegundos atrasado em relação ao que havia ficado na superfície. Por que ocorreu este atraso?*

A14: *Foi porque o avião estava indo muito rápido.*

A7: *Pode ser que o relógio não funcione direito por causa da resistência do ar.*

P: *Muito rápido? O que significa ir muito rápido?*

Confusão de vozes [...]

P: *Os múons são partículas que têm uma vida muito breve. Experiências feitas no laboratório europeu de física de partículas, o CERN, em Genebra, na Suíça, constataram que essas partículas, quando em repouso em relação à Terra, vivem apenas cerca de 2 microssegundos. Porém, essas mesmas partículas são criadas quando raios cósmicos provenientes do espaço se chocam com as partículas da atmosfera. Como a velocidade dos raios cósmicos é aproximadamente a velocidade da luz, podemos fazer uma conta para saber a distância que ele percorreria durante sua vida?*

Os alunos fizeram a conta e chegaram ao valor de 600 m.

P: *A camada da atmosfera tem cerca de 10 km de altitude. Vocês acham que poderíamos detectar os mésons atingindo a superfície da Terra?*

A20: *Sim, mas chegariam mortos.*

P: *Mas quando eles morrem, eles se desintegram e se transformam em outras partículas. Vocês sabiam que conseguimos detectar vários múons chegando aqui na superfície da Terra? Como vocês acham isso ser possível?*

A21: *Eles podem se deslocar com uma velocidade maior que a da luz.*

P: *Seria realmente uma possibilidade A21, mas a velocidade dos raios cósmicos é medida e é mesmo igual à velocidade da luz. Como eles conseguem chegar até aqui?*

Neste episódio, o professor apresenta dois resultados empíricos alheios à experiência cotidiana de seus alunos, promovendo o conflito cognitivo inspirado nos resultados de Köhnlein e Peduzzi (2005), relativos à crença dos estudantes na visão de ciência empirista-indutivista. A14 e A7 buscam argumentos apriorísticos para justificar o atraso medido em relógios atômicos, enquanto A21 recorre à noção de tempo absoluto, para justificar o aumento da velocidade do múon e sua detecção na superfície terrestre. Apesar de compreenderem as situações, os alunos não conseguem explicá-las utilizando seus próprios conceitos intuitivos. O professor não as responde imediatamente, para que os estudantes reflitam sobre as situações contra-intuitivas apresentadas.

Embora tradicionalmente utilizada no ensino de relatividade por motivações diversas (HOLTON, 1969), ainda tínhamos dúvidas quanto à pertinência de abordar a experiência de Michelson-Morley em nossa intervenção. Optamos, no estudo piloto, por inserir uma discussão sobre a mesma, em função de sua importância na tentativa de constatação da existência de um referencial absoluto. Para que os estudantes pudessem compreender a experiência e seu objetivo, recorremos a uma situação análoga na qual é calculado o tempo para um barco percorrer uma distância na direção da correnteza de um rio e em uma direção perpendicular à mesma (PEDUZZI, 1998, p. 652). Esquematizamos o interferômetro de Michelson no quadro e explicamos o

funcionamento, oferecendo noções de interferência de ondas e reforçando a analogia com o exemplo dos barcos. A animação da experiência de Michelson-Morley, exibida no vídeo, certamente contribuiu para a sua visualização por parte dos alunos, o que provavelmente não surtiria o mesmo efeito, caso fossem utilizados recursos estáticos, como quadro-negro e transparências.

A terceira questão do pós-teste solicitava uma descrição dos objetivos e do funcionamento da experiência de Michelson-Morley. Alguns alunos demonstraram ter assimilado, mesmo que parcialmente, os seus principais fundamentos, como nas afirmações de A12: *O objetivo era provar que todo movimento era relativo em relação ao éter. A experiência falhou;* e de A18: *O principal objetivo da experiência era “mostrar” que a luz sofria interferência da velocidade da Terra, mas o objetivo não foi alcançado mesmo com a persistência dos dois. A experiência não deu certo pelo fato de que a luz não sofre interferência da velocidade da Terra, e por isso ficou famosa.* Outros a detalharam minuciosamente e com extrema coerência em suas explicações, como a colocação de A1: *O principal objetivo era provar que a Terra está em movimento em relação ao “éter” (sic). Isso não foi conseguido, pois a velocidade da luz não é relativa, não depende de um referencial. [...] um raio de luz é dividido em dois, uma dessas partes iria para cima e outra continuaria reto, esses raios bateriam num espelho, voltariam e se juntariam novamente e depois disso era “medido” (sic) essa junção. Eles queriam que um raio fosse mais devagar, pois a Terra está em movimento.* Desenhando um esquema da experiência, A17 relata: *Um feixe de luz era emitido de A, atingia o espelho B e seguia para duas direções, para o espelho C, e o prolongamento seguia para o espelho D. Como eles chegavam paralelos à normal, eles voltavam na mesma direção se encontrando novamente no espelho B e sendo refletidos ao ponto E. De acordo com as idéias dos físicos, como a Terra está em movimento, os*

feixes de luz iam em algum momento diferenciar a velocidade um do outro, se desencontrando no ponto E. Mas isso não ocorreu, então se detectou que a luz não altera sua velocidade. Outro resultado interessante foi a presença de um desenho esquemático da experiência em um número expressivo de respostas. Acreditamos que isto esteja diretamente relacionado com a utilização do vídeo como recurso áudio-visual na aula sobre a discussão da mesma, conforme anteriormente mencionado enquanto elemento de motivação e demonstração (ROSA, 2000).

A falta de plausibilidade para os estudantes devido ao caráter contra-intuitivo do segundo postulado (ARRUDA, 1994) nos fez refletir sobre a melhor forma de abordá-lo no estudo piloto. No Episódio 5, transcrevemos fragmento da aula na qual fazemos a discussão desse postulado partindo de uma situação idealizada proposta em um dos textos entregues aos estudantes.

Episódio 5 – Postulados da Relatividade Restrita – fragmento da aula 5

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *Uma pessoa está no interior de um trem que se move incrivelmente na velocidade da luz. De repente, ela decide olhar para a parte de trás do vagão; o que ocorre? Ela não conseguirá ver nada nesta direção, pois como está se movendo na mesma velocidade que o raio de luz, o mesmo não conseguirá chegar aos seus olhos.*

A7: *Mas a parte da frente ele consegue ver?*

P: *Sim, os raios que partem da frente atingirão os olhos da pessoa, pois a mesma se deslocaria contra os mesmos. Mas os que vêm de trás, vocês concordam que não serão vistos? Esta situação não é estranha para vocês?*

A18: *Se no MRU, qualquer coisa que você faça não dá para saber se está em movimento, então acho que a luz deve chegar na mesma velocidade.*

P: *Exatamente, se a parte de trás realmente sumir, nós acabamos de descobrir uma maneira de saber que estamos em MRU no interior do trem e isso violaria o primeiro princípio. Daí vem o segundo postulado da Teoria da Relatividade Especial de Einstein que diz que a velocidade da luz deve ser a mesma para todos os observadores. (O professor escreve na lousa: 2. A velocidade da luz é a mesma, independente do movimento da fonte ou do observador). Então todos verão a luz se deslocando sempre com a mesma velocidade.*

Confusão de vozes [...]

P: *Voltando ao segundo postulado, imaginem que estou parado em relação ao solo e tem uma outra pessoa parada na minha frente com uma lanterna*

na mão. Qual é a velocidade que o raio de luz se desloca da lanterna até mim?

A10: $c = 3 \times 10^8$ m/s

P: Agora, se eu começar a me mover em direção a esta pessoa, qual será a velocidade que a luz chega até mim?

A18: A mesma.

P: E se eu me afastar da lanterna? Qual será a velocidade que os raios de luz chegarão até mim?

A18: A mesma.

P: E se o cara que está segurando a lanterna começar a se movimentar na minha direção ou fugindo de mim, qual será a velocidade com que a luz me atinge?

A15: A mesma.

Partindo das discussões efetuadas nas aulas anteriores, o professor sistematiza os postulados da Relatividade Restrita. A explicação do segundo postulado foi realizada de duas maneiras. Inicialmente, é abordada uma situação na qual o segundo postulado é apresentado como consequência do primeiro (princípio da relatividade). Na seqüência, o professor faz o uso de evidências experimentais, como o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley e a medida da velocidade da radiação emitida pelo decaimento de píons que se deslocam em altíssima velocidade, para legitimar o segundo postulado.

As implicações dessa aula foram evidenciadas no pós-teste (Anexo 6). Com relação ao segundo postulado da relatividade restrita, contemplado na questão dois, a maioria utilizou-o para justificar a constância da velocidade da luz quando observada tanto por Fábio, como por Pedro, associando com a experiência, como podemos constatar nas afirmações de A17: *A velocidade da luz não muda. Exemplo: experiência de Michelson-Morley, a velocidade da luz não muda mesmo estando em movimento a favor, ou contra ela;* e de A13: *A velocidade será a mesma para os observadores, pois a luz sempre que se propaga no vácuo, ou no ar, tem a velocidade de 3×10^8 m/s, fazendo assim com que todos vejam a mesma coisa.*

Contudo, ainda houve aqueles (sete alunos) que utilizaram a adição galileana de velocidades em suas respostas e apresentaram valores maiores ou menores que c . Este resultado está de acordo com os obtidos por Arruda (1994). Acreditamos que o segundo postulando seja uma questão central para o ensino da relatividade restrita e que o mesmo precisa ser bem fundamentado para os alunos, tanto em resultados empíricos, como em argumentos teóricos. Essas reflexões levaram a diferentes abordagens no estudo final, assim como à dedicação de um tempo maior nessa discussão.

No último episódio analisado, relatamos o terceiro momento pedagógico através da obtenção da dilatação temporal pela imposição do segundo postulando. Partindo da experiência sugerida por Daly e Horton (1994), analisamos a consequência da dilatação temporal, deduzimos sua expressão via aplicação do Teorema de Pitágoras e interpretamos quantitativamente diversos valores de gama.

Episódio 6 – Consequência dos Postulados: Dilatação Temporal – fragmento da aula 5

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *O valor de gama é sempre menor ou maior que 1?*

A6: *Acho que é maior, pois demora mais tempo para B do que para A.*

P: *Quando é que gama vale 1?*

A1: *Se $v = 0$.*

P: *Exatamente A1, isso significa que, se o trem estiver em repouso em relação ao solo, os tempos por A e B serão iguais.*

A8: *Sim, porque daí a trajetória vista por B não vai mais ser um triângulo.*

P: *OK, o que pode fazer com que o valor de gama aumente?*

A6: *Basta que a velocidade do trem aumente.*

P: *Então vamos calcular o valor de gama para algumas velocidades. Qual a velocidade aproximada de um trem?*

A14: *Uns 200km/h.*

P: *E qual é o valor de gama para esta velocidade? Podem usar calculadora se desejarem.*

[...]

A7: *É uma conta muito difícil, professor! Os números não cabem na minha calculadora.*

P: *Por quê?*

A7: *Porque quando eu divido v por c como o professor pediu dá um valor muito pequeno, quase zero.*

P: *Está certíssimo A7. Percebam que para velocidades cotidianas como a velocidade de um carro, de uma pessoa ou até mesmo do som, o valor de*

gama é muito próximo de 1. Portanto, para estes casos, podemos dizer que os observadores irão medir praticamente o mesmo tempo.(Escreve no quadro: Quando $v \ll c$, gama tende a 1 e os tempos medidos pelos dois observadores são praticamente iguais. A mecânica clássica trata o tempo como uma grandeza absoluta, isto é, que tem o mesmo valor para todos os observadores). *Porém, para velocidades próximas à velocidade da luz, o gama passa a ser significativo* (Mais uma vez utilizando a lousa: Se $v = 0,5c$, temos que $\gamma = 1,155$).

P: O que isso significa?

A6: Que o tempo que passa para B é 1,155 vezes maior que o tempo que passa para o A.

P: Então, 1 segundo para o A corresponde a quanto tempo para o B?

A: 1,155 s.

P: E um ano para o A?

A: Dá 1,155 anos para o B.

P: (aumentando o valor de v) Se $v = 0,8c$, temos que $\gamma = 1,7$. Se $v = 0,99c$, temos que $\gamma = 7$. Considere dois irmãos gêmeos, um fica aqui na Terra, enquanto outro se desloca no espaço com uma velocidade de $0,99c$. Suponha que a viagem tenha durado um ano para o gêmeo dentro da nave, quanto tempo duraria para o que ficou na Terra?

A: Sete anos.

P: Assim, poderíamos dizer que o gêmeo que viajou foi para o futuro, pois quando ele retornou, seu irmão estava seis anos mais velho que ele!

A12: Nossa, que esquisito!...

Os exemplos numéricos apresentados favoreceram a manipulação das expressões matemáticas e principalmente a análise das suas conseqüências físicas: como o fator γ é maior que um, o tempo passa mais lentamente para o observador em movimento. Podemos notar também o espanto de A12 ante às conseqüências de postular a velocidade como absoluta, particularmente as implicações físicas da dilatação temporal.

Considerando as categorias utilizadas no Quadro 2 para apresentar os resultados do pré-teste, o Quadro 3 foi organizado de modo a comparar aqueles aos resultados aferidos do pós-teste, relacionando as concepções de tempo predominantes nas respostas dos alunos.

Quadro 3. Comparação entre as concepções dos estudantes levantadas na aplicação dos nossos instrumentos. O preenchimento cheio representa a categoria apontada somente no pré-teste, o X indica a detectada somente no pós e a hachura vertical indica que as categorias foram identificadas em ambos os questionários.

	TP	TC	TN	TQ	TD	TI	TS	TR
A1			■				■	X
A2	■	■					■	
A4	■	■					■	
A5			▨					
A6		■	■				■	
A7	■	■	▨					
A8		■					■	X
A9	■		▨				■	
A10		▨						
A11		▨			■		■	
A12			■					X
A13			■					X
A14			■					X
A16	■	X					■	
A17		■				■	■	X
A18				■	■		■	X
A19		■					■	X
A20			■					X
A21			■			■		X

Em concordância com a coexistência de diferentes concepções, observamos que, no pré-teste, diversos estudantes evidenciaram mais de uma categoria em sua resposta. Por outro lado, cinco deles apresentaram unicamente a categoria TN na elucidação das mesmas. Essa constatação nos parece um indício de que, estabelecendo a adoção da concepção newtoniana de tempo, o indivíduo tende a abandonar a utilização das outras em suas explicações. Paradoxalmente, essa convicção constitui um obstáculo epistemológico evidenciado na resistência à mudança, como no caso de A5, A7 e A9. Essa categoria é equivalente ao racionalismo clássico, indicando justificativas para que os estudantes A1, A12, A13, A14, A20 e A21 tenham apresentado no pós-teste uma evolução (em processo) para a categoria TR, tendo em vista a complexidade gradativamente crescente associada às mesmas. Ainda, A1 e A21, além de enquadrados na categoria TN, identificaram-se em outras, as quais não eram mutuamente exclusivas

em relação à primeira; no pós-teste. Para A8, A17 e A19, a evolução de TC a TR indica que as atividades desenvolvidas podem ter sido mais significativas.

De modo geral, acreditamos, com exceção dos estudantes cujos dados não nos permitem aferir categorias no pós-teste, que a inserção da discussão sobre os princípios da teoria da relatividade restrita nesse momento propiciou, além de um refinamento quanto à concepção de tempo, uma melhor compreensão dos demais conceitos envolvidos, mesmo no contexto da Física Clássica. Isso se deve à opção metodológica adotada, pois, na implementação da problematização inicial, discutiu-se a fundo situações envolvendo o referido contexto.

As questões quatro e cinco do pós-teste (Anexo 6) visaram identificar se os alunos assimilaram a relação de dependência entre o tempo e a velocidade de diferentes referenciais, evidenciando, assim, o tempo como grandeza relativa. Nesse sentido, a questão quatro retoma a situação do tempo de vida do múon nos diferentes referenciais. As respostas indicam que parte da amostra não assimilou os pressupostos da dilatação temporal, como, por exemplo, na afirmação de A14 *Acho que será menor. Pois se em repouso ele já é destruído tão rapidamente, imagine nessa velocidade*, a qual explicita uma confusão entre duração e velocidade. Alguns permaneceram com o conceito newtoniano de tempo absoluto, como podemos notar na resposta de A19: *Acho que sim, acho que o tempo de vida dele é independente da sua velocidade, não importa se ele está parado ou com uma velocidade altíssima, o seu tempo de vida será sempre de dois microssegundos*.

Aproximadamente, 50% dos alunos mencionaram a dependência do tempo com a velocidade da partícula, como evidenciado nas respostas de A20: *Não, porque quanto mais se aproxima da velocidade da luz, o tempo passa mais devagar*; A21: *Acho que será um pouco mais de dois microssegundos, devido a sua grande velocidade*; A1: *Não,*

pois o tempo é relativo. Quanto maior a velocidade, maior o “tempo de vida” desta partícula em relação a velocidades baixas e de A7: Não, pois quanto mais perto da velocidade da luz o tempo aumenta ou fica lerdo.

A última questão, de natureza metacognitiva, permitiu aos alunos externar se a intervenção provocou alguma alteração sobre suas concepções prévias em relação aos conceitos abordados. Dos vinte e dois alunos participantes do processo, apenas três expressaram que não notaram nenhuma alteração em suas concepções. Destacamos, a seguir, alguns dos depoimentos.

A1: Com certeza, antes não fazia a mínima idéia que o tempo não é uma coisa fixa e sim relativa. Antes parecia uma loucura pensar em uma viagem no tempo, as atividades “abriram” minha mente.

A18: Muito, pois antes eu pensava que o tempo não era relativo, principalmente. Mas outras coisas como repouso e MRU. Agora tenho outras concepções de tempo. Nunca verei o tempo com os mesmos olhos.

A12: Sim. Saber que o tempo é relativo, pois o tempo num relógio dentro de um avião supersônico passa mais devagar que o tempo num relógio na Terra.

A7: Sim, minha noção de tempo foi ampliada pelas discussões constantes feitas sobre o assunto.

A19: Sim. Havia coisas que eu nunca tinha parado para pensar antes como o fato de que se eu corresse na velocidade da luz e olhasse para trás, eu não conseguiria ver nada, achei tudo muito interessante. Também pude constatar que não importa a que velocidade você está, se você jogar algo para cima ele cairá na sua mão novamente. E essas e outras coisas obviamente mudaram um pouco a minha idéia de tempo porque, principalmente, me fizeram perceber que eu não entendo e nem realmente sei o que é o tempo.

A14: Sim. A minha concepção por tempo, que ele é relativo. As experiências do MRU, com o skate. Eu pensava que em grande velocidade a lâmpada cairia para trás em um ônibus, mas ela cai reto e o skate com o papel ajudaram.

A8: Antes eu tinha um conceito de tempo muito diferente. Eu não tinha muita noção, mas com as atividades o meu conceito de tempo chegou mais perto do correto, pois eu aprendi que o tempo pode se atrasar em velocidades muito altas e isso foi o que mais mudou o meu conceito.

A10: Sim, para mim melhorou, pois aprendi que tempo não tem uma definição exata.

Mesmo considerando as características do estudo piloto e outros contratemplos ocorridos durante o processo, acreditamos que a atividade obteve resultados significativos. A1, A18 e A12 expõem claramente que suas concepções de tempo foram ampliadas em virtude do reconhecimento da relatividade do mesmo, ainda que não

associem isso ao segundo postulado. A12 se refere a um exemplo discutido em sala para justificar esta alteração e, no mesmo sentido, A14 cita a experiência do *skate* como responsável pela mudança na sua noção de movimento, o que demonstra a relevância das estratégias utilizadas. A8 explicita seu conflito, permeado por sua concepção de ciência, centrada na crença da existência de um conceito correto de tempo, e julga que as aulas o fizeram se aproximar do mesmo; A10 identifica que o mesmo não tem uma definição precisa e A19 expõe que as atividades fizeram com que ele percebesse que não sabe o que realmente é o tempo. A19 relata também que achou interessante ter que pensar em situações hipotéticas como os experimentos pensados. Certamente, as aulas de Física deveriam contribuir mais para o desenvolvimento desse tipo de habilidade nos alunos.

Dois meses após o término da intervenção piloto, aplicamos um teste de retenção (anexo 7), com questões semelhantes às dos pré e pós-testes, para perceber se os principais temas abordados haviam sido incorporados à estrutura cognitiva dos estudantes. Em relação ao conceito de tempo, dois estudantes que haviam esboçado a noção de tempo relativístico no pós-teste não a identificaram no teste de retenção. Acreditamos que estes estudantes, ao superar a situação de conflito, preservaram suas crenças anteriores. No referido teste, pudemos observar que as noções de TN e TR coexistem para os estudantes. Dos que manifestaram TR, apenas um aluno (A1) negou a definição de tempo absoluto de Newton: *A idéia de tempo de Newton é equivocada, pois o tempo pode ser influenciado pela velocidade e, dependendo disso, ele não flui uniformemente.* Com exceção deste, os demais demonstraram concordar com a definição newtoniana de tempo. Este resultado está em conformidade com os estudos constantes na literatura específica, os quais apontam que a incorporação da noção relativística de tempo depende de atividades e discussões mais aprofundadas e

duradouras, as quais foram aperfeiçoadas na segunda intervenção. Entretanto, consideramos que a atividade tenha sido profícua, uma vez que os estudantes não utilizaram noções animistas como TP, ou empiristas como TC, como o haviam feito no pré-teste.

Na próxima seção, descrevemos os procedimentos utilizados na segunda intervenção, destacando as alterações provocadas pela análise dos resultados do estudo piloto.

3.3 O Estudo Final

A seqüência didática foi reformulada e aplicada pelo próprio pesquisador, como anteriormente mencionado, em uma turma do primeiro ano do Ensino Médio (turno noturno), com vinte alunos de 17 anos em média, pertencentes a uma escola pública, localizada em um bairro de classe média na cidade de Florianópolis, SC. Recebemos apoio total da direção para desenvolvê-la na escola. Conversando com a professora de Física, pudemos levantar as características gerais da turma, o conteúdo trabalhado até aquele momento e a metodologia utilizada pela mesma. A professora, em formação (área de Química), adota um livro com excesso de exercícios padrão cuja solução incide em operativismo mecânico, metodologia de aulas expositivas com a ênfase na transmissão e avaliações baseadas na aplicação de algoritmos e fórmulas. Visando seguir a seqüência de conteúdos do livro, durante todo o primeiro semestre os estudantes trabalharam apenas a Cinemática Clássica e iniciariam as leis de Newton, somente no segundo semestre.

Uma das questões centrais apontadas no estudo piloto foi a necessidade de dedicar mais tempo aos segundo e terceiro momentos pedagógicos e proporcionar uma distribuição mais homogênea de tempo para os três momentos. Decidimos, portanto, solicitar um número maior de aulas, num total de vinte, divididas em dez encontros de duas aulas seqüenciais, mais outros dois encontros destinados à aplicação dos questionários (pré e pós-testes). As aulas foram registradas em vídeo, com o consentimento dos responsáveis pelos alunos, para que pudéssemos transcrever os episódios de ensino com mais precisão do que no estudo piloto. Em um primeiro momento, os estudantes demonstraram certo desconforto com a presença da câmera, porém, no decorrer das aulas, comportavam-se como se a mesma não estivesse lá.

A intervenção piloto também proporcionou uma reflexão sobre a pertinência das questões do pré-teste, o que acarretou a reformulação do mesmo. Na primeira questão, além de complementarmos com outras frases, buscando atender adequadamente a todas as categorias pré-determinadas, incluímos uma questão aberta, para os alunos exporem sua definição pessoal de tempo. Na questão 2, solicitamos explicitamente aos estudantes que opinassem sobre o conceito de tempo absoluto de Newton e, com o objetivo de confirmar esta noção de tempo, um item da terceira questão foi reformulado para evidenciar se o aluno separa a noção de tempo de sua medida. Ainda na questão 3, abordamos a possibilidade de definir uma unidade de tempo indivisível e, com isso, pudemos diferenciar os posicionamentos dos mesmos em relação à noção de tempo contínuo ou discreto. Algumas questões não sofreram alterações, outras foram excluídas em função da complexidade do enunciado. Propusemos, ainda, uma situação descontraída que envolvia o paradoxo dos gêmeos. As questões constam do Anexo 8.

As atividades desenvolvidas em sala são sumarizadas no Quadro 4. Neste, destacamos as principais alterações em relação ao estudo piloto e detalhamos seus respectivos motivos. No primeiro encontro, em função do levantamento inicial, inserimos, na situação aberta abordada, uma discussão dos conceitos de estados de movimento, referencial e adição de velocidades, utilizando animações ilustrativas. No segundo encontro, segmentamos os trechos do vídeo para promover a discussão de aspectos específicos do tempo, em conformidade com o apontado por Silva Rosa (2000). Essa estratégia já havia sido readequada na própria intervenção piloto, quando abordamos o experimento de Michelson-Morley. A realização de atividades extraclasse não foi priorizada, devido ao perfil dos estudantes, uma vez que a maioria trabalha durante o dia, segundo informações obtidas informalmente com a professora da turma.

Quadro 4: Resumo das atividades realizadas no Estudo Final e comparação com as realizadas no Estudo Piloto

ENCONTRO	ESTRATÉGIAS: PILOTO	ALTERAÇÕES	JUSTIFICATIVAS
1 – Princípio da Relatividade de Galileu	Aula dialógica, com a formulação do princípio da relatividade de Galileu através do confronto com resultados experimentais – experimento do <i>skate</i> ; Leitura e debate do texto <i>Em absoluto</i> ; Análise do Geocentrismo e Heliocentrismo e outras aplicações.	Inserção da discussão sobre os conceitos de movimento, repouso, referencial e adição galileana de velocidades.	Resultado do pré-teste.
2 – Discussão sobre as concepções de Tempo	Abordagem histórico-filosófica do conceito de tempo e das diversas maneiras de medi-lo. Apresentação pelos estudantes, em pequenos grupos, de pesquisa realizada sobre o tema. Análise interdisciplinar da música <i>Semana que Vem</i> (Pitty); Exibição do vídeo da Discovery Channel.	Retomada da aula anterior e análise do texto <i>Em absoluto</i> ; Exibição e debate de trechos do vídeo; Inserção da discussão sobre tempo psicológico via análise da música <i>Melhor Prá Mim</i> (Leoni – Anexo 9); Abordagem quantitativa das unidades de tempo.	Exigüidade de tempo na aula anterior, pela inserção de tópicos adicionais; o vídeo foi segmentado para enfatizar os aspectos de interesse, direcionando a atenção dos alunos.
3 – Evolução da precisão de relógios e experiência de Hafele-Keating	Leitura do artigo de Andrewes (2002, p. 96-97). Evolução na precisão das medidas do tempo, dos relógios de pêndulo até os atômicos; Abordagem das experiências de Hafele-Keating, da detecção de múons e espelho de Einstein.	Análise do quadro com evolução dos relógios (dos solares aos atômicos – Anexo 10) e não a apresentação pelos alunos; Abordagem somente da experiência de Hafele-Keating.	Expor uma situação conflitiva de cada vez, para que os estudantes assimilem e tenham mais tempo para formularem suas explicações.
4 – Finitude da Velocidade da luz, experiências para medir c e detecção de múons.	Não abordamos o tema finitude no estudo piloto.	Debate sobre a questão 3 do pré-teste, instauração do conflito sócio-cognitivo, sobre finitude da velocidade da luz; Quadro de velocidades (Anexo 11) Experiências de Galileu, Röemer e Fizeau. Problemática da detecção de múons.	Resultado do pré-teste. Manutenção da estratégia da aula anterior, de apresentar situações conflitivas mais espaçadamente.
5 – Aspectos Históricos, Física no Final do Século XIX, Detecção do Éter	Não abordamos no estudo piloto.	Exposição da crença no sucesso da física clássica no final do século XIX e de alguns fenômenos para os quais a mesma não oferecia explicações adequadas. Importância do éter como meio de propagação das ondas luminosas e referencial absoluto.	Promover uma discussão sobre as visões de ciência dos estudantes e contextualizar o momento histórico no qual a relatividade surge.

6 – Experiência de Michelson-Morley	Apresentação de situação análoga envolvendo composição de movimentos. Exibição de vídeo, representando a experiência de Michelson-Morley através de uma animação.	Ênfase nos aspectos fenomenológicos, no caráter ondulatório da luz e abandono da análise quantitativa.	Dificuldade matemática do exemplo utilizado na intervenção piloto.
7 – Avaliação em processo	Questões sobre princípio da relatividade e concepções de tempo.	Questões abordando conceitos centrais para a seqüência, como princípio da relatividade de Galileu, finitude da velocidade da luz, éter e experiência de Michelson-Morley (Anexo 12).	Averiguar a assimilação de conceitos fundamentais para a Relatividade Restrita pelos estudantes, para reorientar as atividades da seqüência.
8 – Postulados da Relatividade Restrita	Apresentação dos postulados a partir de uma experiência de pensamento.	Aspectos da vida de Albert Einstein; Apresentação do enigma gerador da relatividade e enigma do espelho; Postulados da Relatividade Restrita e início de análise das conseqüências.	Contextualização da infância e a adolescência de Einstein; Mais tempo para o segundo momento pedagógico.
9 – Postulados da Relatividade Restrita e dilatação temporal	Dedução matemática da expressão da dilatação temporal a partir da experiência de pensamento semelhante ao relógio de luz (Daly e Horton, 1994).	Retomada e animação da experiência;	Mais tempo para o segundo momento pedagógico e para a discussão das implicações da experiência.
10 – Aplicação da dilatação temporal e Evidências Experimentais	Essa etapa estava associada ao quinto encontro, e não foi enfatizada adequadamente.	Análise numérica da dilatação temporal; Aplicação da dilatação em situações-problema, paradoxo dos gêmeos; Explicação da experiência de Hafele-Keating e da detecção dos múons à luz da dilatação do tempo.	Necessidade de destinar mais tempo à aplicação do conhecimento.
11 – Contração do comprimento	Não abordamos esse tema no estudo piloto.	Dedução da contração do comprimento a partir da dilatação temporal; Análise numérica da contração do comprimento; Reinterpretação da detecção dos múons a partir da contração das distâncias.	Relação entre tempo e espaço. Necessidade de mais tempo destinado à aplicação do conhecimento.

Em função da indicação de Köhnlein e Peduzzi (2005) de que, tipicamente, os estudantes do Ensino Médio apresentam uma concepção de ciência empirista-indutivista, abordamos experimentos realizados para a detecção da velocidade da luz e

utilizamos como motivação para a interpretação do resultado negativo da experiência de Michelson-Morley a detecção do éter. Realizamos também uma avaliação (Anexo 12) em um dos encontros, a fim de acompanhar mais diretamente a efetividade das discussões. Incluímos, no décimo encontro, uma breve biografia de Einstein, com o objetivo de desmistificar a figura do cientista e elucidar alguns aspectos de sua personalidade. Optamos também por abordar os experimentos pensados em momentos distintos, para dedicar mais tempo à discussão e análise de cada um, numa perspectiva menos matemática. Inserimos, por razão de completeza e simetria, a discussão da contração do espaço.

O pós-teste também foi readequado (Anexo 13). A questão 1 foi reformulada para verificar a identificação do princípio da relatividade einsteiniano (primeiro postulado). Outras questões foram propostas contendo situações-problema nas quais os estudantes deveriam aplicar a noção de tempo relativístico e relacioná-lo com o conceito de velocidade. Na questão 8, pudemos avaliar a evolução do perfil conceitual de tempo e se os alunos negariam a categoria TN. Na mesma linha da intervenção piloto, duas questões de natureza metacognitiva explicitariam a consciência dos estudantes em relação ao processo.

No próximo capítulo, apresentamos os resultados obtidos nesse estudo final, através das respostas dadas pelos estudantes aos questionários e da transcrição de episódios de ensino recortados das gravações de vídeo realizadas durante as aulas. Confrontamos os mesmos com o referencial teórico descrito anteriormente, analisando possíveis relações entre as evoluções conceituais e os fatores diversos que possam ter interferido no processo.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, avaliamos as respostas dos alunos aos questionários, categorizando-as a fim de obter padrões para a seleção e análise dos episódios de ensino, totalizando vinte e um, em moldes semelhantes aos da discussão apresentada na Subseção 3.2.2. O grupo analisado é misto em gênero, apresentando idades diversificadas. Essas características heterogêneas contribuíram para evidenciar as dificuldades na construção dos conceitos.

Nossos dados, obtidos da gravação da segunda intervenção em vídeo, contêm informações de como as idéias foram argumentadas em sala de aula, fornecendo apenas indícios de como são internalizadas pelo sujeito, pelo intercruzamento com as manifestações individuais escritas. Dessa forma, visamos descrever a evolução das idéias como consequência da interação social, sendo esta a unidade básica de análise. Na seção seguinte, discorreremos sobre a manifestação individual das concepções dos estudantes, catalogadas no pré-teste, e a construção de significados compartilhados, na implementação da problematização inicial.

4.1 Levantando os Posicionamentos Iniciais dos Estudantes

No pré-teste, identificamos o pensamento dos estudantes antes da intervenção de ensino, buscando identificar os esquemas, subsistemas e totalidades que fazem parte desse pensamento, bem como a coerência que o aluno possa vir a demonstrar ou não entre esses vários elementos. A distribuição das respostas dadas às três primeiras questões do mesmo nos permitiu uma categorização das concepções prévias dos estudantes acerca do conceito de tempo, a qual é apresentada no Quadro 5, e foi formulada segundo as categorias propostas no capítulo anterior. A sexta questão nos indicou se os alunos tinham alguma noção relativística do conceito e essa foi manifesta

por três estudantes (A2, A9 e A10). O quadro nos revela também que para cinco deles a percepção psicológica de tempo é predominante, enquanto A14 apresenta a preocupação com sua característica discreta.

Quadro 5. Concepções espontâneas levantadas no pré-teste. A primeira linha representa as categorias conforme catalogadas anteriormente, e a primeira coluna, os alunos participantes, discriminados por A1, A2, ... A20.

	TP	TC	TN	TQ	TD	TI	TS	TR
A1	■	■			■			
A2			■					■
A3			■		■			
A4			■					
A5		■			■			
A6			■					
A7			■					
A8	■	■						
A9			■					■
A10			■					■
A11		■						
A12	■							
A13			■					
A14		■		■	■			
A15	■	■			■			
A16		■						
A17		■				■		
A18	■							
A19			■					
A20		■						

Na seqüência, destacamos algumas frases presentes nesses questionários que nos auxiliaram na escolha das categorias para cada aluno, as quais compõem as faixas de um perfil, em conformidade com a concepção de perfil conceitual de Mortimer (1996).

A1: [...] às vezes o professor não está sendo claro e isso dificulta a passagem do tempo. [...] se ficamos sentados olhando para o céu o tempo passa sem olhar para o relógio, vemos que não tem nada de verdadeiro e matemático [...] a gente pode escrever o futuro.

A2: O tempo passou a ser analisado com a evolução do homem, medido com a criação do relógio [...] no universo o tempo se mantém [...] são viagens espaciais e acima da velocidade da luz + ou - 300000 m/s o tempo acima desta velocidade passa mais devagar, conforme a teoria de Albert Einstein.

A3: O tempo para mim é um momento que sempre passa seja ele bom ou ruim [...] as estrelas refletem o futuro que virá.

A4: *O tempo não há relação com nada, o tempo passa eternamente sendo que ninguém pode mudar isso.*

A6: *O tempo é o instante em que vivemos. Ele não pára e na minha opinião não deveria ser medido por um relógio (horas/minutos), pois ele é uma coisa à parte...*

A8: *O tempo são os 24 números que dividem o dia em horas. [...] o tempo não ocorre só no relógio, mas na nossa vida também.*

A9: *Pra mim o tempo é uma linha sem começo, meio e fim e que está em movimento sem que ninguém possa pará-lo. [...] acho que é verdadeiro porque o relógio anda mais devagar se ele estiver na velocidade da luz.*

A10: *Vivemos no tempo, ele está em nós, mas não temos o controle. [...] O tempo não se divide, nós é que separamos ele [...] As teorias dizem que ao andarmos na velocidade da luz, atrasamos o tempo em si.*

A12: *Se não tiver relógio, dias nem noites não podemos definir ou dizer se existe tempo.*

A14: *não, sem ele (tempo) ser cronometrado não iria ter hora pra nada (hora certa) [...] o tempo é o presente, futuro, passado... e tudo que acontecer é o tempo (destino) [...] sim, em algum momento nessas divisões não vai sobrar nada.*

A16: *acho que não (haveria tempo) pois não teria como saber isso, qual seria a hora certa de fazer alguma coisa.*

A19: *Para mim, tempo é algo que pode ser medido pelo relógio (em horas, minutos, segundos, anos...) e serve para nos “orientarmos” e de uma certa maneira, nos entendermos melhor, pois se cada um medisse o tempo de seu próprio modo, cada um viveria em seu “próprio mundo”.*

A20: *Tempo pra mim nada mais é que olhar para o relógio e ver as horas.*

A afirmação de A14, explícita em: *em algum momento nessas divisões não vai sobrar nada*, justifica a opção por indicá-lo em TQ, numa perspectiva oposta à de A10, o qual aponta *O tempo não se divide, nós é que separamos ele*. As demais categorias, TC e TD, estão relacionadas à menção a unidades e destino, respectivamente, como na colocação de A3 de que *[...] as estrelas refletem o futuro que virá*. A categoria TC, manifesta nas frases de A8, A16, A19 e A20, e a categoria TQ como um refinamento, apresentam estreita analogia com o perfil epistemológico empirista, conforme apontado por Martins (2004). A categoria TN também é análoga ao perfil epistemológico racionalista tradicional de Martins (2004) e a categoria TD leva em conta seus aspectos ontológicos, uma vez que A5, A14 e A15 apresentam uma noção de pré-determinação para o futuro, mesmo demonstrando uma não-diferenciação entre o conceito de tempo e sua medida. Essa questão nos pareceu pertinente e foi abordada no segundo encontro a partir da análise de trechos de vídeo e de músicas.

O tema gerador é o conceito de tempo e, admitindo a sala de aula como um espaço para enculturação (MORTIMER, 1996), o professor buscou oportunizar aos estudantes uma reflexão sobre suas próprias idéias, como transcrito nos episódios a seguir. No primeiro episódio, a diferenciação entre o conceito de tempo e sua medida é abordada, visando à superação desse obstáculo epistemológico.

Episódio 1 – Tempo e medida de tempo – Fragmento do 2º Encontro

CD1 Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *O vídeo começa mostrando o mundo físico e diz que não existe tempo no mundo físico, o que vocês acham?*

A1: *Eu concordo.*

A9: *Eu acho que o tempo existe, só não está sendo medido.*

P: *Aliás, ele termina falando que o relógio é usado para medir o tempo, mas o tempo existe sem o relógio. Vocês concordam que o tempo existe mesmo sem o relógio?*

Muitos demonstram concordar. Confusão de vozes...

A8: *Claro...*

P: *Todos concordam? Por que? Como é que a gente poderia medir o tempo sem um relógio?*

A8: *Pela idade de uma pessoa.*

A14: *Dia e noite né...*

A1: *Pôr do sol*

A15: *Lua né...*

P: *Então parece que para medir tempo, a gente precisa de alguma coisa que esteja se repetindo... Quando vocês falam pôr do sol, nascer do sol... E se não tivesse dias e noites? [...] E se a Terra não girasse nem em torno de si mesma nem em torno do Sol, ou seja, se não tivesse dias e noites, teria como a gente perceber a passagem do tempo?*

A6: *Sim, por causa da velhice, a pessoa nasce e cresce...*

[...]

A14: *Claro, primeiro a mulher tá grávida, daí o neném vai crescendo...*

A20: *Eu acho que daí não teria como.*

P: *Não sei se teríamos como comemorar aniversário né?*

Confusão de vozes. Risos. Estudantes manifestam concordância gestualmente.

A2: *Você não teria como medir, talvez, o tempo. Porque no referencial você poderia medir o tempo.*

A14: *No caso do aniversário foi uma coisa que a gente inventou, eu acho.*

P: *Será que se não tivesse dias e noites, não teria como medir o tempo?*

A4: *Eu acho que não.*

A20: *Poderia até ter, mas seria mais difícil.*

A2: *Além de máquinas que já foram criadas né?*

P: Por que será que o homem tem tanta preocupação com o tempo? Eu, por exemplo, to sempre preocupado... que horas bate o sinal, etc... Minha vida é muito regida pelo tempo... Toda hora eu estou preocupado com o tempo...

Estudantes demonstram concordar.

A1: Na verdade você tá preocupado com o relógio né, e não com o tempo.

[...]

A14: Com o tempo também. Meu tempo voa né.

A20: Se você tá preocupado com o relógio, você tá preocupado com o tempo também.

A1: Não, mas pro relógio. Porque se não existisse relógio, seria totalmente diferente...

Percebemos que muitos estudantes separam tempo de sua medida, ou seja, percebem que o tempo pode existir, mesmo sem estar sendo medido, exceção feita a A1 e A20, que evidenciam claramente a concepção empirista, constatada no pré-teste, uma vez que, para eles, o tempo não existiria sem o relógio. Notamos também que a grande maioria associa a passagem do tempo à idéia de uma mudança constante, vide manifestações de A8, A6 e A14, por exemplo, concordando com a idéia contida no vídeo de que não existiria tempo num mundo físico estático e configurando como um possível obstáculo epistemológico para a compreensão do tempo newtoniano. A9, por sua vez, não demonstra crer nessa visão e percebe o tempo como independente do mundo físico, o que confirma que sua idéia de tempo está mais próxima da newtoniana.

Quando A14, A1 e A15 mencionam formas de medir o tempo, baseadas em ciclos, o professor destaca que as mesmas estão imbuídas de um processo cíclico, seguindo o viés histórico. Aparelhos de medida que se baseavam em fluxo de materiais, como clepsidras e ampulhetas, foram historicamente substituídos pelos que funcionavam a partir de oscilações, como os de pêndulo, o que acabou originando a noção de subdivisão do tempo em partes iguais. A premissa que rege nossa intencionalidade educativa é solução conjunta das situações-problema cuidadosamente elaboradas pelo professor. No próximo episódio, descrevemos uma análise quantitativa da medida de tempo a partir de um trecho de uma música.

Episódio 2 – Tempo: unidades de medida – Fragmento do 2º Encontro
CD1 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *Quanto tempo dura a aula?*

A9: *Quarenta minutos.*

P: *Quando ela faz a pergunta: Quem sabe quanto vai durar? Ela espera uma resposta que seja um número, acompanhado de uma unidade. Quando a gente fala em tempo 40 minutos, 2 horas, 2 anos, 1 século. [...] A gente consegue medir isso numericamente.*

P: *O que é uma hora? O que é um minuto? O que é um segundo? O que é uma hora?*

A20: *É 60 minutos.*

Risos

P: *Muito bom A20! Vou até anotar isso aqui no quadro!*

A14: *O que é 60 minutos?*

P: *O que é um minuto?*

A20: *60 segundos.*

P: *Muito obrigado, vou anotar isso também.*

Risos

P: *O que é um segundo?*

A14: *1300 milésimos*

A4: *100 centésimos*

P: *100 centésimos de segundo ou mil milésimos de segundo, é...Tá tudo certo... Mas, como é que a gente convencionou uma hora? Ah, uma hora é esse tempo aqui.*

A14: *Algum louco fez isso...*

P: *Qual foi a nossa primeira noção, desde que a gente está aqui no mundo, de tempo? [...]*

A2: *Que pode ser medido, acho que em horas, o dia né? A sucessão de dias e noites.*

P: *Certo, não é essa a primeira sensação que a gente tem? Pô, dia-noite, dia-noite, tem uma certa duração aquilo ali... Então é uma coisa que se repete, e a gente fatalmente vai pegar as nossas unidades em função daquela duração. Quanto tempo dura, aproximadamente, uma rotação completa da Terra?*

A9: *Vinte e quatro horas.*

P: *Então, a idéia é essa, a rotação da Terra dura 24 horas... e na verdade o que é uma hora? É a vigésima quarta parte de um dia. Em uma hora, a Terra gira 15 graus. Essa é a convenção. Agora, A20, é estranho. Porque normalmente nosso sistema é decimal. A gente fala assim: dez, cem, mil... e esse sistema de medida de tempo não é um sistema decimal, ele é sexagesimal, 1 hora é 60 minutos, 1 minuto é 60 segundos. E isso é estranho, olha só porque, [...] posso dizer que 1,2 horas é 1 uma hora e 20 minutos?*

A9 e A7: *Não*

P: *[...] 1,2 horas seria uma hora e quantos minutos?*

A7: *Doze*

P: *Isso, porque você faz 0,2 vezes 60. Dá uma hora e doze minutos. Mas porque será que ficou esse sistema? Por que que a gente não fala, sei lá, que uma hora é igual a 100 minutos?*

A2: *Ter um dia com 20 horas, em vez de 24.*

P: *Exatamente. Aliás,[...] como é que se descobriu que o dia tem 24 horas?*

A9: *Não se descobriu, se fez.*

Risos

P: *Isso, não é uma coisa descoberta... É uma coisa feita, convencionada. Como A2 falou, se a gente quisesse dividir o dia em vinte partes iguais, uma hora seria maior...*

A2: *A hora, o minuto e o segundo como são... eles têm que ser pra dividir o tempo em partes iguais, o dia em partes iguais, teria que ser mantido numerais iguais... Mas poderia ser qualquer valor, um dia com dez horas, uma hora com duzentos minutos.*

P: *Exatamente! [...]*

A2: *[...] Desde que tenha uma seqüência lógica para dividir o tempo. Como foi feito, uma seqüência lógica, a cada 60 segundos 1 minuto, a cada 60 minutos 1 hora, a cada 24 horas um dia.*

A14: *Eles dividiram o tempo, né?*

P: *Beleza. Agora, matematicamente, quando a gente olha a história, por que o sistema sexagesimal ainda ficou... até pra falar em graus, a gente diz que uma volta inteira tem 360°. A explicação matemática é a seguinte, o 60 tem muito mais divisores do que o 10. O que são divisores? Matemática agora... Quais são os divisores de 10?*

Alunos falam simultaneamente os divisores de 10

P: *Isso, [...] o 10 possui 1,2,5 e 10 como divisores.[...] O 60, [...] tem muito mais divisores.[...] Vamos colocar alguns: o 2 é divisor, o 3 é, o 4, o 5, o 6... Então você pode falar em um terço de hora, um quarto de hora, um sexto de hora e assim por diante. Então é um sistema que é matematicamente mais interessante, mais útil de se trabalhar numericamente.[...] Um sistema que acabou ficando pela praticidade dele.*

A resposta, aparentemente óbvia, dada por A20, levou a uma importante discussão sobre as unidades de medida de tempo conduzida pelo professor. A2 relacionou a contagem do tempo com a sucessão de dias e noites, ou seja, o movimento periódico de rotação da Terra. Uma outra pergunta do professor gerou uma discussão sobre convenções de unidades de medida. Os estudantes demonstraram concordar com a hipótese de arbitrariedade proposta por A2, salientando sua posição social perante o grupo, pela importância e atenção dadas pelos seus pares a suas falas.

Apesar da arbitrariedade das unidades escolhidas para medir o tempo, o professor, através de uma abordagem interdisciplinar e histórica, aborda o conceito matemático de divisor de um número para mostrar a praticidade de trabalhar com o

sistema de base sexagesimal (numeração mesopotâmica), e assim evidenciar que, apesar de arbitrário, o ser humano preferiu o sistema que facilitasse sua abordagem numérica. Historicamente, o sistema sexagesimal para a medida de tempo perdurou em relação a um sistema decimal (e linear) em virtude de sua contribuição na desmistificação da predição dos eclipses¹⁵.

Além do sistema de unidades, uma análise histórica da evolução da precisão da medida de tempo também foi implementada, inspirada na estratégia bem sucedida, utilizada na intervenção piloto. No episódio 3, recortado do terceiro encontro, percebemos como a abordagem histórica da precisão proporcionou um debate sobre as concepções de tempo discreto ou contínuo.

Episódio 3 – Precisão da medida de tempo – Fragmento do 3º Encontro

CD1 Legenda: P – o autor e professor

 An – alunos

P: *Um nanossegundo corresponde a um bilionésimo de segundo. É pouco, né? [...]* (Risos) *O relógio atômico gente, em média, ele atrasa menos de um nanossegundo por dia. Ele leva 3000 anos para atrasar um segundo. [...]*

A1: *Professor, então até hoje a tecnologia não conseguiu medir certinho? Medir o tempo do relógio certinho?*

P: *A tecnologia está sempre conseguindo medir intervalos de tempo cada vez menores. Então, um relógio de quartzo conseguiria medir milissegundos, o atômico já consegue medir nanossegundos. [...]* *E cada vez mais essa precisão vai aumentando.*

A1: *Então vai chegar uma hora que vai estar certo, não vai mais estar faltando?*

P: *Lembra que eu perguntei para vocês no questionário inicial. [...]* *Perguntei para vocês se chega uma hora que você não consegue mais dividir?*

A9: *Não*

P: *Sempre você consegue dividir o tempo em uma fração menor?*

A14: *Sempre, sempre... Até o 0,000000000000...*

¹⁵ A periodicidade das fases da Lua é de vinte e nove dias e meio. O ano solar, relacionado a observações sistemáticas das cheias do Nilo, tem periodicidade de 365,25 dias. Do ponto de vista de um observador terrestre, o Sol e a Lua giram em torno da Terra em planos que fazem um ângulo de 5° entre si. Os eclipses só ocorrem quando o Sol e a Lua estão muito próximos da linha dos nodos (a intersecção dos planos de suas órbitas aparentes). A linha dos nodos apresenta uma precessão, devido à interação gravitacional entre os astros, girando em sentido oposto ao da rotação do Sol, num período de 346,6 dias (ano do eclipse). 223 lunações de 29,5 dias correspondem a 18 anos e 11 dias, em anos do eclipse. Após aproximadamente esse intervalo de tempo ocorrerá um eclipse muito semelhante ao anterior e durante esse período, muitos outros eclipses diferentes (NEUGEBAUER, 1969, p. 168).

P: *Deixa eu contar um segredo para vocês. Os físicos ainda não têm um consenso em relação a esta questão. [...] Alguns acham que o tempo é contínuo, ou seja, que você sempre pode dividir em uma fração menor, outros que o tempo é discreto, ou seja, existiria uma unidade de tempo que você não pode mais dividir. [...] É uma questão de fronteira.*

A14: *Mas se for dividindo e dividindo chega uma hora que some...*

A pergunta de A1 reforça a pertinência da categoria TQ, escolhida para representar a díade contínuo-discreto, a qual não havia sido focada no estudo piloto. Esse mesmo aluno demonstra acreditar em uma unidade de tempo indivisível, caracterizando-o como discreto, enquanto A14 defende a idéia de que o tempo é contínuo, manifestada pela noção de que esse intervalo de tempo, no limite, tenderia a zero. Sua manifestação destoa da nossa interpretação de sua resposta *sim, em algum momento nessas divisões não vai sobrar nada* dada à questão 3.2 do pré-teste, indicando a não-adequação do referido enunciado para os nossos objetivos.

No item 2.1 do pré-teste, abordamos a idéia de fluxo do tempo. Ainda analisando as faixas do perfil conceitual de tempo dos estudantes, um verso de uma das músicas apresentadas no segundo encontro possibilitou uma discussão sobre as concepções de passado, presente e futuro. A manifestação espontânea de opiniões levou ao debate sobre a díade determinismo-probabilismo, transcrito no quarto episódio, a seguir.

Episódio 4 – Passado, presente e futuro – Fragmento do 2º Encontro

CD1 Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *O futuro é o presente e o presente já passou. O que é o presente então?*

A9: *É o passado.*

A18: *É esse momento que já passou... [...] Então não é mais presente, já é passado.*

Confusão de vozes

A1: *Eu acho que não existe nem futuro.*

[...] Confusão de vozes... A1 e A7 falam simultaneamente

A7: *O futuro é o presente, o que você tá agindo hoje? Da sua ação de hoje vai vir o resultado no futuro.*

A1: *Pra mim só existe o passado. O futuro a gente ainda não viveu e nem sabe se vai viver. Então não existe futuro. A gente fica fazendo planos para daqui a dez anos sendo que a gente não se preocupa com o passado.*

A7: *Mas amanhã já é o futuro.*

A9: *Mas o amanhã nunca chega!*

[...] *Confusão de vozes...*

A2: *Do meu ponto de vista, o passado é um tempo longo, o futuro é um tempo longo e o presente é uma linha que separa os dois. O presente é um instante. Esse instante é mínimo.*

Muitos alunos falam ao mesmo tempo [...] O professor se dirige a um grupo que estava discutindo entre eles.

P: *A15, o que você acha dessa idéia de presente, passado e futuro? Você concorda com essa frase, aí? O futuro é o presente, e o presente já passou?*

A15: *Passa... Claro, você só chega rapidamente ao futuro porque o tempo passa né. Aí não dá tempo de resolver as coisas do presente. Mas eu acho que não, acho que o futuro é algo que tu almeja, assim, tu sempre tem sonhos pro futuro. Ele não se torna tão rapidamente no presente assim, ... vai se tornar... mas... tem lógica a frase até...*

A14: *Eu acho que tem dois tipos de futuro e dois tipos de passado. Tem o passado que você diz: Ai, queria ter feito isso... E tem o que você diz: Ontem fiz isso, ontem fiz aquilo.*

Conversas paralelas

P: *E vocês acham que o futuro de cada um já está traçado. Vocês acham que o que vai acontecer no futuro já está pronto?*

A1: *Não*

A2: *Claro que não.*

Vários alunos dizem que não...

P: *Alguém acha que sim? Que o futuro já está traçado? O tal do destino.*

A14: *Com certeza! [...] Tipo assim ó, o jeito que a minha vida vai acabar, é o jeito que já imaginavam, como se fosse Deus. Como já está tudo certo, tudo o que eu ia fazer. Todas as minhas atitudes, eu acho que Ele já sabia.*

P: *E você A8, você acha que não?*

A8: *Não. [...] É que nem assim ó. Em um emprego, se o cara não trabalhar, ele não vai conseguir chegar a comprar um carro e se ele correr atrás, ele vai chegar.*

P: *Mas será que o destino dele já estava traçado pra não comprar o carro?*

A8: *Não, ele pode escolher. Ou eu vou correr para conseguir o carro, ou ficar parado. [...] Não adianta pensar, aí, o meu destino é ter um carro e ficar parado esperando.*

A14: *Não, mas assim. O seu carro, se você não tiver vai ser seu destino.[...]*

A8: *Eu acho que o destino é, praticamente, nós que fazemos. Se o cara trabalhar e fizer de tudo para conseguir o carro, eu vou conseguir.*

A7: *O amanhã depende de hoje.*

A1: *Digamos que o professor ganhou na loto tá? Entrou um ladrão na casa do professor e roubou tudo [...]*

Risos. Muitos alunos falam simultaneamente.

A1: *Seu futuro é ser pobretão pro resto da vida? Seu destino já estava traçado? É isso?*

P: *Esse era meu destino?*

A1: *Não, por isso que eu tô falando, não é destino. Acho que foi uma coincidência, você ganhar hoje e ser roubado hoje. Não é destino.*

Novamente, muitos alunos falam simultaneamente.

A14: *Se você tiver que casar com uma pessoa, você pode passar oito anos noivado com outra que vai acabar casando com aquela. Mesmo ficando tanto tempo com outra. Ah, eu acho que não...*

P: *O debate aqui gente, apesar de ser debate que talvez entre até a religião aí, e entram outras coisas de filosofia, mas entra, pessoal, um debate muito forte na física mesmo. São duas correntes: o determinismo que a crença de que no mundo, tudo já está traçado, existe uma lei, a gente pode compreender tudo, a gente pode saber tudo que vai acontecer fisicamente, por exemplo, toda a teoria do Newton é muito determinística, por que: Se o cara te dá a posição inicial de um corpo, e a força que está agindo, você consegue prever onde este móvel vai estar depois de muito tempo. [...] Alguns paradigmas da Física Moderna vêm com uma teoria probabilística, ou seja, olha, tem coisas que podem acontecer. Existe uma probabilidade de isso acontecer. Existe uma probabilidade de o elétron estar aqui nesse lugar, eu não tenho certeza disso. [...] Esse debate que a gente está tendo aqui, apesar de ser um debate que faz parte da nossa vida, ele é um debate com certeza da física. E a Física Moderna vem mostrar que o mundo não é tão determinístico assim, como Newton e alguns pensadores achavam.*

Essa transcrição ressalta a relevância de uma categorização que seja capaz de discernir as noções de tempo determinístico e probabilístico, denominadas no capítulo anterior como TD e TI respectivamente, as quais também não foram abordadas satisfatoriamente no estudo piloto. A1 demonstra acreditar em um futuro incerto, apresentando indícios de probabilismo e aleatoriedade, peculiares de TI, enquanto A7 acredita que, apesar de não pré-determinado, o futuro depende de nossas ações, caracterizando uma visão determinista causal, a qual é compartilhada por A8, mas diferente da manifestação de A14 de uma crença em destino e de que nada podemos fazer para mudá-lo. Este mesmo aluno, ainda, faz uma diferenciação entre tipos de passado e futuro, distinguindo os eventos próximos dos distantes temporalmente. A15 demonstra uma preocupação com a exigüidade do tempo e da inevitabilidade do futuro, mesmo não conseguindo fazer as *coisas* do presente. Em relação ao conceito físico de tempo, vale destacar a interpretação de A2 sobre as noções de presente, de passado e de futuro, em concordância com a concepção de tempo da cinemática clássica, a qual

descreve um movimento a partir das posições ocupadas por um móvel em instantes de tempo distintos. Cabe, também, um destaque à colocação final do professor, pois o mesmo apropria-se da discussão epistemológica da ciência, de seu próprio repertório culturalmente construído. Ao incorporar as noções sistematizadas dos alunos, leva as mesmas a evoluírem, acessando a zona de desenvolvimento proximal definida por Vygotsky (BOLZAN, 2002).

As noções de presente, de passado e de futuro foram retomadas pelo professor no quarto encontro, com o objetivo de propor uma situação geradora da discussão sobre a finitude da velocidade da luz. Esse encontro foi planejado em virtude dos resultados obtidos no pré-teste, os quais mostraram que aproximadamente metade dos estudantes acreditava que a luz apresentava propagação instantânea, diferentemente dos obtidos no estudo piloto. O item 2.3 do pré-teste solicitava aos alunos que assinalassem se, ao observarem o céu em uma noite estrelada, estariam visualizando o passado, o presente, ou o futuro. Esse item permitiu, além de avaliar a percepção dos estudantes acerca dessas noções, verificar também a concepção de finitude da velocidade da luz. Dessa forma, essa situação foi proposta novamente no início do quarto encontro e, no episódio transcrito na seqüência, analisamos os posicionamentos dos alunos e os argumentos utilizados para defendê-los.

Episódio 5 – Finitude da velocidade da luz – Fragmento do 4º Encontro

CD1 Legenda: P – o autor e professor

 An – alunos

P: *um astrônomo está olhando, através de uma luneta, para o céu e [...] de repente ele observa que uma nova estrela apareceu. A gente pode dizer que a estrela nasceu exatamente naquele dia em que ele viu a estrela?*

A2 e A10: *Não*

P: *[...] A19, o que você acha?*

A19: *Acho que não...*

[...]

P: *Quando a gente olha pro céu, a gente vê o passado, o presente ou o futuro?*

A1: *Eu particularmente vejo o passado.*

A19: *Eu vejo as estrelas.*

Risos [...]

P: *Por que A1?*

A1: *Porque a gente fica pensativo né, e quando você fica pensativo a gente só lembra do passado... O que que adianta ficar pensando no futuro, gastando tempo...*

[...]

A2: *Eu vejo o passado.*

P: *Por que A2?*

A2: *Por que a propagação da luz, embora seja muito rápida, algumas dessas estrelas que a gente vê no céu nem existem mais. O que está se vendo é a propagação da imagem dela. Se a gente vê a estrela sumir, é porque ela já sumiu há muito tempo.[...]*

A9 concorda e argumenta simultaneamente...

P: *Todos concordam com o que A2 está dizendo?[...]*

A1: *Seria impossível você olhar pro céu e imaginar uma coisa no futuro, tipo uma astronave no céu...*

A14: *Mas se é muito rápida, você vê...*

A2: *Porque a propagação da luz é muito rápida, só que a distância que as estrelas estão de nós é muito grande.*

P: *Quero uma opinião... A15?[...]*

A15: *Não sei professor, eu olho pro céu porque eu acho o céu bonito, não fico olhando para saber se é o passado, presente ou o futuro [...]*

Risos

P: *Tudo bem A15, mas você concorda com A2, quando ele diz que vemos o passado?*

A15: *Eu acho que não é o passado, pra mim é o presente.*

[...]

P: *Imaginem que uma pessoa está segurando uma lanterna e tem uma outra olhando. Suponha que, de repente, o cara acende a lanterna, eu quero que vocês me digam, a outra pessoa vê a luz exatamente no mesmo instante?*

A9, A18 e A14: *Não*

A9: *Não, demora.*

P: *Demora um pouco para esse cara ver a luz da lanterna?*

A9: *Depende da distância, se ele estiver mais longe demora mais, e se tiver mais perto demora menos.*

A14: *Na hora, tu aí e eu aqui, é na mesma hora é óbvio né?*

A6: *Não [...]* *É porque esse tempo é tão curto, que parece que é na mesma hora, mas na verdade não é.*

[...] O professor realiza a experiência na sala. Acende a lanterna e pergunta se os alunos a vêem na mesma hora.

A14: *Foi na mesma hora.*

A9: *Aqui é na mesma hora!*

A18: *Demora, demora!*

A15: *Demora?*

A18: *É, demora um segundinho...*

Confusão de vozes.

[...]

A2: *Pra essa distância o tempo só poderia ser medido em nanossegundos. [...] A nossa percepção, a curta distância, só poderia ser medida em nanossegundos.*

P: *Será que em nanossegundos?*

A14: *Muito menos né...*

A10: *A luz anda a trezentos mil quilômetros por segundo né?*

Vários estudantes, como A1 e A15, não associaram a situação proposta com a questão da finitude da velocidade da luz, sendo que o primeiro retomou sua noção de incerteza no futuro, explicitada no Episódio 4, e o segundo demonstrou uma falta de interesse na discussão. A resposta de A2 conduziu a discussão para a questão da velocidade da luz. Mais uma vez, a posição social deste aluno perante a sala é evidenciada. Nesse episódio especificamente, ele auxilia o professor na construção da noção de finitude da velocidade da luz junto aos seus colegas. As idéias que surgiram na sala de aula foram desenvolvidas, claramente, num processo interpsicológico, no qual a opinião de um indivíduo, ao ser apropriada pelo professor e pelos outros estudantes, é submetida à discussão, à crítica e acaba sendo modificada, transformada. Ao final, temos a contribuição de uma série de noções individuais e não temos como estabelecer se o indivíduo que gerou a proposição inicial permaneceu com ela ou se assimilou a construída no processo.

Outra situação proposta pelo professor permite avaliar se seria possível medir o tempo gasto pela luz para percorrer pequenas distâncias. Alunos como A6, A9 e A18 demonstram uma capacidade de abstração, pois, mesmo não sendo capazes de medir diretamente, eles indicam que existe um tempo gasto pela luz. Por outro lado, A14, vinculado à sua realidade sensorial (o que o caracteriza com uma forte concepção animista/realista), protesta que, para pequenas distâncias, a luz é instantânea. A2 refere-se ao tempo em nanossegundos, evidenciando a assimilação das discussões promovidas no terceiro encontro (parte delas transcrita no Episódio 3) e que o mesmo já utiliza as

unidades trabalhadas para explicar outros fenômenos. A10 demonstra conhecer o valor da velocidade de propagação da luz.

Seguindo a proposta de Angotti *et al.* (1978) para o ensino da relatividade, sugerindo a promoção de uma mudança atitudinal dos estudantes perante sua interação com o conhecimento, adotamos a estratégia de proposição de situações conflitantes (com as concepções prévias) e da formulação conjunta de hipóteses, ainda enquanto problematização inicial. No final do terceiro encontro, apresentamos uma versão simplificada da experiência de Hafele-Keating e analisamos, no episódio transcrito na seqüência, as tentativas de explicação dos alunos.

Episódio 6 – Experiência de Hafele-Keating – Fragmento do 3º Encontro

CD1 Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

P: *Ele pegou dois relógios atômicos que estavam sincronizados, na Terra, certinho, colocou um dentro do avião e deixou o outro na Terra. Esse relógio que estava dentro do avião deu voltas ao mundo durante três dias. [...] Quando o avião voltou, o relógio que estava dentro dele teve um atraso de 275 nanossegundos em relação ao que tinha ficado na Terra. Eu quero que vocês parem e pensem um pouquinho sobre isso, tá? A gente pode tentar achar algumas explicações para isso também [...]. O relógio atômico não atrasa um nanossegundo por dia, em três dias, ele atrasou quase 300 nanossegundos. O que vocês acham que pode ter acontecido?*

A9: *Vai ver ele estava com defeito.*

A8: *Eles tentaram fazer o contrário, deixar aquele relógio parado e colocar o outro dentro do avião?*

P: *[...] Esses dois relógios são idênticos A8, [...] se eles tivessem trocado, o atraso continuaria sendo no relógio que ficou no avião. [...]*

A10: *Ele deu a volta em que velocidade?*

P: *Olha, um avião normalmente vai ter uma velocidade de 900 a 1000 km/h. Se o avião for supersônico ele pode ir ainda mais rápido. [...]*

A14: *Mas para dar a volta ao mundo em três dias ele teria que ser muito mais rápido.*

A2: *Hoje em dia tem alguns caças que voam com quase 2000 km, 1950.*

P: *Que é o tal do mach 2, mach 3, né? [...]*

A16: *É a gillette para fazer a barba.*

P: *Além da gillette, o que significa uma avião mach 3?*

A2: *Três vezes a velocidade do som.*

[...]

A14: *Mas você tá dando um exemplo, ou isso é real? (voltando ao atraso)*

P: *Sim, isso é real, a experiência foi feita mesmo.*

A14: *E ele deu a volta no mundo? Ele acha que deu a volta no mundo né?*

Conversas paralelas

A10: *A professora de física disse o seguinte. (Neste momento A10 começa a representar um relógio de luz e explica que a trajetória seria diferente se ele estivesse em movimento...)*

A9: *Mas eu acho que isso aí não é...*

A10: *Não, eu sei, mas estou pensando se fosse isso, o atraso poderia ser por causa da velocidade, não sei...*

[...]

P: *Será que a velocidade influenciaria? Você acha que se eu andar mais rápido, o meu relógio vai atrasar?*

A9: (representando o relógio de luz) *Eu acho que o tempo que ele demora é um centímetro, não importa a velocidade...*

A8: *Daí a gente poderia andar mais rápido para adiantar o horário! Porque assim eu trabalho menos!*

A10: *Professor, a polaridade do planeta não influencia em nada?*

P: *Como assim? Poderia ser alguma coisa como o campo magnético da Terra, por exemplo?*

A9: *É mesmo.*

A14: *É uma hora é uma coisa, outra hora muda.*

A2: *Poderia ser a gravidade da Terra...*

A2: *A gravidade da Terra ela, muda em relação à altitude?*

O sinal bate e a discussão é encerrada.

A evolução da precisão da medida de tempo realizada durante o terceiro encontro foi fundamental para a compreensão do objetivo e do resultado da experiência de Hafele-Keating. Segundo Hall (1978), essa experiência é mais facilmente alcançada pelos estudantes de Ensino Médio, pela relativa simplicidade de se imaginar um relógio atrasando em um avião. Seu resultado, entretanto, é claramente contrário do que acontece no cotidiano dos alunos, e sua exposição pelo professor objetiva provocar um conflito cognitivo para que os mesmos sintam a necessidade de adquirir novos conhecimentos capazes de fornecer explicações racionais para esses fenômenos, seguindo as etapas de um ensino baseado no modelo de mudança conceitual. Assim, é fundamental propiciar um momento no qual os estudantes formulem tentativas de explicação e construam socialmente suas hipóteses para que se sintam participantes do processo de construção do conhecimento. Inicialmente, as tentativas de explicação dos alunos A8 e A9 manifestam o comportamento alfa previsto pela teoria de Piaget,

procurando negar a perturbação e vinculando o atraso a um defeito de origem mecânica no relógio. Isso está associado, também, à faixa empirista do perfil. O posicionamento de A10 demonstra que o mesmo já possui algum conhecimento prévio sobre o assunto, como já havia sido detectado no pré-teste. Apesar disso, ele não parece ter clareza e começa a procurar outros argumentos, como efeitos magnéticos que poderiam influenciar no mecanismo de funcionamento do relógio atômico.

Nesse contexto, outra dificuldade relacionada é de que o apelo à criatividade, intrínseco a esse tipo de processo mais aberto, não pode ser visto apenas como uma figura de retórica empregada no início do processo, o qual permite que o aluno exponha sua visão. A ampla ecologia conceitual de cada indivíduo e a forma como ele se relaciona às idéias em construção deve concorrer para que o processo seja constantemente criativo e aberto.

A relação entre velocidade e atraso é retomada pelo professor. A8 expõe elementos de seu universo pessoal, associando-o com a possibilidade de tornar o tempo mais lento. A14 demonstra deficiência na noção de ordem de grandeza, duvidando que o avião consiga dar uma volta ao mundo. Por fim, A2 procura uma relação com o valor da gravidade. Em discussões abertas, é comum o padrão evolutivo das idéias apontar para outro rumo e, nesse caso, o aluno tenta associar a seus conhecimentos prévios de cinemática um problema potencialmente perturbador.

Esse entendimento parcial dos alunos evolui à medida que eles avançam nas discussões. No encontro seguinte, após uma problematização sobre a finitude da velocidade da luz, apresentamos um quadro que continha uma relação de diversas velocidades em ordem crescente. O comentário de um aluno nos chamou a atenção e a discussão que se segue é transcrita no Episódio 7.

Episódio 7 – Quadro de velocidades – Fragmento do 4º Encontro
CD1 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *Esse aqui é um caça norteamericano “blackbird” consegue ir a 3500 km/h, ele é Mach quanto então?*

A2 e A9: *Mach 3*

A9: *É quase um Mach 3*

P: *Olha o recorde de velocidade de um avião, que é o último que eu consegui pesquisar, é o X43, ele vai a 7700 km/h.*

A9: *Esse aí é bom para atrasar o relógio!*

A10: *A essa velocidade ele dá uma volta na Terra em quanto tempo?*

P: *Olha, a Terra tem um comprimento total de uns 40000 km. [...] Ele iria gastar quanto? Dá umas cinco horas [...]*

A10: *Aquele ali (o mencionado na experiência Hafele-Keating), falei 3 horas, ali...*

P: *Aquele da experiência da aula passada era um avião comercial, sua velocidade era de uns 900 km/h.*

A9: *Esse aí seria bom para atrasar o relógio!*

P: *Será? Você acha que esse avião aqui (X43) seria bom para atrasar o relógio do cara?*

A9: *Ué, se dependendo da velocidade atrasa... daí sim*

P: *Realmente A9, esse aí seria muito bom para atrasar o relógio...*

A10: *Quer dizer que o cara entra no avião, e quando ele pousa de novo, ele está 3 horas atrasado?*

P: *Pode ser que ele esteja mais novo dependendo...*

A9: *Mais novo não, os outros é que estão mais velhos.*

P: *Tá, mais novo em relação aos outros então...*

A relação entre o atraso do relógio e a velocidade do avião é retomada em função da observação feita por A9. Em um primeiro momento, o professor não se dá conta do comentário e, atendo-se à pergunta formulada por A10, oferece condições para que os estudantes estimem o tempo gasto para que os aviões dêem uma volta ao mundo, mencionando o comprimento total da Terra. Porém, A9 repete a observação, insistindo para que o professor o esclarecesse se existe alguma relação com a velocidade ou não. Quando o professor confirma a observação de A9, A10 já começa a prever os efeitos da dilatação temporal. Vemos que essa estratégia favorece a assimilação da teoria, uma vez que o conceito de tempo relativístico, tão notadamente contra-intuitivo, vai aparecendo e sendo construído ao longo de todo o módulo.

Nesse ponto, reportamos novamente à estrutura das atividades. A aplicação do pré-teste iniciou o processo de apropriação das idéias dos alunos dentro de um sistema conceitual coletivo, o qual foi se delineando ao longo das aulas, tendo como temas geradores os conceitos de tempo e velocidade. Com a apresentação de dados empíricos contra-intuitivos e de uma breve contextualização histórica, realizamos no sétimo encontro uma checagem, por nós denominada avaliação em processo, a fim de identificar a percepção dos estudantes sobre os conceitos até então trabalhados e redirecionar as decisões da seqüência didática.

Dezessete estudantes responderam ao questionário, o qual consta do Anexo 12. Em relação à precisão dos relógios, apenas dois não mencionaram o relógio atômico, citando a detecção de nanossegundos. Aproximadamente 60% (dez estudantes) mencionaram o valor numérico da grandeza velocidade da luz e a identificaram como maior velocidade conhecida. Quanto ao conceito de tempo, os estudantes não demonstraram muita preocupação em detalhar suas respostas, mas algumas são dignas de nota. A20 afirma que *antes eu pensava que o tempo era apenas um relógio, mas [...] fui percebendo que sem o tempo a gente não ia saber nem locomover*, evidenciando uma relação entre tempo e distância (velocidade). A6 preserva sua concepção de tempo cronológico: *para mim tempo continua significando um relógio* e A17 mostra sua consciência em relação às atividades, ao colocar: *tempo parece ser algo tão sem explicação, que nem nos empolgamos em entender... mas com as aulas, meu modo de pensar mudou bastante...*

Despendemos um tempo considerável com a implementação do primeiro momento pedagógico, na explicitação e clarificação das idéias dos alunos, assim como num detalhamento minucioso dos fenômenos empíricos contra-intuitivos que instauraria o conflito. Esse procedimento objetivava criar condições para que os obstáculos à

construção da noção relativística de tempo pudessem emergir já nesse momento. Dessa forma, o professor tinha em mente facilitar as discussões subseqüentes, interpretando o conceito de zona de desenvolvimento proximal como um espaço de construção, em detrimento da interpretação da mesma como sistema de suporte (*scaffolding*), mais corrente na literatura (MORTIMER, 1994).

4.2 Sistematizando e Estruturando os Postulados da Relatividade Restrita

A construção do conhecimento depende também da habilidade do professor em lidar com as manifestações dos alunos, se pensarmos o processo de ensino não somente como a construção de uma idéia científica particular, mas também como a generalização dessa peça do conhecimento a uma variedade de situações diferentes. Dessa perspectiva, as exposições do professor são tão importantes quanto as atividades participativas. Ao sistematizar e generalizar o conhecimento, o professor não transmite, mas oportuniza que os alunos se apropriem desse entendimento. Essa etapa foi prevista em nosso planejamento e implementada no segundo momento pedagógico.

O afastamento crítico foi concretizado pela introdução dos dois postulados da Teoria da Relatividade Restrita. O primeiro postulado foi apresentado através de uma retomada da primeira aula, mostrando o princípio da relatividade de Einstein como uma ampliação do princípio galileano a todas as leis da natureza. O segundo, porém, em virtude da falta de plausibilidade para os educandos, já previamente indicada pela literatura (ARRUDA, 1994), foi abordado de diversas maneiras. Inicialmente, apresentamos uma situação na qual três observadores deveriam medir a velocidade da luz. Classicamente, os estudantes deveriam aplicar a transformação de Galileu para determinar essa velocidade e esse resultado estaria em desacordo com o postulado da constância da velocidade da luz. No oitavo episódio, transcrevemos o momento inicial da abordagem do segundo postulado e observamos o posicionamento dos estudantes.

P: *Vamos supor que tem um cara aqui, que a gente vai chamar de B, que acende uma luz dentro de um trem que está em movimento. Olha o que esse segundo postulado do Einstein diz: todas as pessoas vêem a mesma velocidade da luz. O B vai ver a luz se afastando dele com essa velocidade aqui, 300000 km/s, o A vai ver a luz com uma velocidade de 300000 km/s, o C [...] também vai ver a luz com a mesma velocidade...*

A10: *Cada um precisa de um referencial.*

P: *[...] eu sei que é estranho isso... Porque quando a gente falou que velocidade é uma grandeza relativa, não a velocidade da luz, à velocidade da luz todos vão medir sempre o mesmo valor independentemente da velocidade que cada um vá. [...] Isso já foi comprovado experimentalmente.*

[...]

A10: *Mas isso tem a ver com aquele aviõzinho que dá a volta na Terra e atrasa?*

P: *Sim, tem a ver. [...] Outra coisa que tem a ver, lembram da experiência de Michelson-Morley?*

A2: *Sim, aham...*

P: *O Einstein falando que todo mundo vê a velocidade da luz sempre a mesma, explicaria porque que os raios não tinham diferença na hora de chegar, lembram?*

(Professor explica rapidamente o interferômetro novamente) [...] *O que que o Michelson achava? Que eles deveriam chegar um na frente do outro, mas, com a teoria do Einstein, como a velocidade da luz é a mesma...*

A14: *Por isso que é a mesma! Foi assim que ele descobriu isso.*

Confusão de vozes

P: *Você falou uma coisa importante A14. [...] alguns caras contariam para vocês a seguinte história: depois que deu o resultado negativo daquela experiência, o Einstein fez a teoria dele. De uma maneira geral isso é uma mentira [...] Ele achava que a velocidade da luz não deveria depender de um referencial, porque a constância da velocidade da luz era uma das leis da natureza. E, para ele, as leis da natureza devem ser as mesmas esteja você fora ou dentro do trem. [...] Lembram de uma situação que a gente viu na primeira aula. [...] Eu estava na carroceria de um caminhão que se deslocava com uma velocidade de 10m/s. Se eu começar a me deslocar para frente com uma velocidade de 2m/s, qual será a minha velocidade para a Renata, que está vendo de fora?*

A9: *12 m/s*

[...]

P: *Pois é, mas se eu acender uma lanterna aqui, e ela emitir um raio de luz, eu vou ver a luz se afastando de mim com 300000 km/s e a Renata que está fora, também vai ver a luz com esta velocidade.[...]*

A6: *Mas será que ele criou essa teoria porque a diferença ia ser tão insignificante que ele não percebeu?*

A9: *É, talvez ele não consiga medir...*

P: *Pode ser uma hipótese [...] Quer dizer, esse valor aqui de 2 m/s é tão pequeno perto do 1 bilhão de quilômetros por hora, que não daria para perceber... É uma colocação interessante...*

A6: *Essa é uma teoria totalmente contrária à teoria do Michelson?*

P: *É. [...]*

A6: *E as duas são comprovadas?*

P: *A do Einstein é comprovada, até experimentalmente.*

O professor explica a experiência feita em um acelerador de partículas da desintegração de píons.

Muitos aspectos importantes apontados nesse episódio são dignos de uma análise criteriosa. Inicialmente, vale destacar o comentário de A10, relacionando a dilatação do tempo com o segundo postulado e surpreendendo as expectativas do próprio professor, que acabou não explorando a riqueza daquela colocação. Em seguida, ao mencionar que o segundo postulado explicaria o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, A14 evidencia sua concepção empirista. Segundo Holton (1969), a abordagem da experiência de Michelson-Morley se tornou *pedagogicamente irresistível* para o ensino da relatividade, porém, reforça uma concepção epistemológica empirista de ciência, a crença de que as teorias surgem dos resultados experimentais. De acordo com Köhnlein e Peduzzi (2005), essa concepção de ciência parece figurar entre as pré-concepções dos estudantes e o professor se prevalecerá da mesma como estratégia de ensino, o que fica explícito no final do episódio. No entanto, nesse momento, o professor esclarece que o principal problema abordado por Einstein era de cunho teórico, e que o segundo postulado tem uma relação direta com o primeiro, oportunizando uma ampliação da visão dos estudantes acerca do desenvolvimento da ciência.

Também, quando da proposição de uma situação semelhante à abordada no primeiro encontro (referente à adição galileana de velocidades), A6 sugere uma interessante interpretação do segundo postulado. Para A6, $c + v$ ou $c - v$ seriam ambos iguais a c , uma vez que as velocidades dos corpos materiais, como a do trem do exemplo proposto, seriam desprezíveis em relação à velocidade da luz. Realmente, o

próprio Maxwell chegou a prever teoricamente que seria impossível comprovar uma alteração na velocidade da luz em função do movimento da fonte a partir de uma experiência que medisse o tempo necessário para a viagem de ida e volta entre uma estação e outra, uma vez que este efeito seria de segunda ordem, ou seja, dependeria do quadrado da relação entre v e c , o qual seria, pelo menos, da ordem de 10^{-8} (PAIS, 1982, p.125). Entretanto, na experiência de Michelson, o interferômetro era capaz de medi-lo e seu resultado negativo foi uma grande frustração para muitos físicos.

A6 ainda solicita uma comprovação experimental do segundo postulado, revelando sua necessidade para a crença na veracidade de uma teoria a partir de resultados experimentais que a comprovem. Nesse sentido, seguindo a sugestão de Rosser (1979), o professor menciona uma evidência empírica da constância da velocidade da luz, na experiência de desintegração de píons.

Tínhamos consciência de que haveria resistência à aceitação do segundo postulado e adotamos a estratégia de pôr seus argumentos em cheque pela via das evidências empíricas. Retomamos a discussão do segundo postulado no início da aula seguinte. Antes mesmo de começarmos a recapitulá-lo, um aluno fez uma pergunta pedindo uma maior discussão sobre o assunto. Mesmo num processo de ensino mais aberto, os alunos entendem que o professor já conhece o assunto, enquanto representante da cultura científica, e têm a expectativa de aprender com o mesmo. No Episódio 9, relatamos algumas questões levantadas pelos estudantes que revelam o processo de conflito vivenciado.

Episódio 9 – Questões sobre o segundo postulado – Fragmento do 9º Encontro

CD1 Legenda: P – o autor e professor

 An – alunos

A8: Professor, só queria fazer uma perguntinha em relação a aula passada, quando o professor falou que a velocidade da luz é igual para todos.

P: Vamos fazer o seguinte A8, como alguns não vieram na aula passada, eu vou retomar essa parte [...] daí a gente discute melhor isso aí.

A8: *Mas é só uma pergunta. Digamos que tenha um caminhão na velocidade da luz, eu to em cima do caminhão, e eu me movo com, digamos, uma velocidade de 2 m/s em cima desse caminhão. Quem vai estar vendo, vai estar vendo na mesma velocidade ou... ? Claro, se você conseguisse ver.*

P: *Boa pergunta! Primeiro que a teoria da relatividade prevê que o caminhão nunca chegaria na velocidade da luz. [...] É uma impossibilidade mesmo, a teoria da relatividade diz que não tem nada que consegue viajar nem na velocidade da luz, um corpo, a luz viaja na velocidade da luz... Se chegasse, é isso mesmo que você falou, mesmo a pessoa andando a 2 m/s, pra quem visse de fora a velocidade seria ainda de 300000 km/s, seria a própria velocidade da luz.*

Em um momento posterior...

A9: *Se um caminhão estivesse apostando uma corrida com um raio de luz, pra ele que ta vendo, a luz estaria com 300 m/s, em relação a ele, e pra quem ta vendo de fora, que só ta observando a situação, veria a luz com que velocidade.*

P: *Também com 300000 km/s.*

A9: *Então isso pra mim não tem lógica...*

A15: *É que nem as naves daqueles filmes que tão andando na velocidade da luz.*

[...]

P: *Realmente A9, a relatividade muitas vezes não vai de acordo ao que a gente pensa.*

Analisemos as situações propostas pelos dois estudantes. A8 expõe claramente que ficou pensando sobre o assunto da aula anterior e formulou previamente uma situação para questioná-lo. De forma análoga, A9 idealiza uma outra experiência de pensamento e revela que, de acordo com suas concepções, a resposta dada pela teoria não é plausível. Para A8, o professor reforça a impossibilidade de corpos com massa de repouso atingirem a velocidade da luz, preparando uma eventual discussão sobre a dinâmica relativística e a variação da massa com a velocidade. Nesse ponto, numa leitura *a posteriori*, identificamos a inabilidade do professor em argumentar pela velocidade da luz enquanto velocidade limite, uma vez que o mesmo apela para a autoridade da teoria em sua defesa. Após o comentário de A9, na parte final do episódio, o professor reforça a diferença, as percepções sensoriais e algumas previsões da Física Moderna, como o postulado da constância da velocidade da luz, as quais transcendem as primeiras.

Não poderíamos deixar de destacar um aspecto fundamental deste episódio: o envolvimento dos alunos com as questões discutidas nas aulas de Física. Os próprios estudantes, propondo experiências de pensamento (*Gedankenexperimente*), mostram que estão ampliando sua capacidade de abstração, justificando novamente o ensino desse tema. Por outro lado, consideramos que deixar que os alunos decidissem pela teoria apenas quando tivessem internalizado seus argumentos poderia significar dispêndios extras de tempo, cujo benefício não era muito claro. Dessa forma, seguindo o enfoque dado às experiências pensadas e procurando aumentar a plausibilidade do segundo postulado, propusemos a experiência idealizada e apontada por Einstein como geradora da relatividade (VILLANI *apud* EINSTEIN, 1981), com o objetivo de relacionar o primeiro postulado com o segundo. A transcrição das opiniões dos estudantes é apresentada no décimo episódio.

Episódio 10 – Enigma gerador – Fragmento do 9º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *Então gente, será que ele conseguiria alcançar um raio de luz? Ou seja, ir na mesma velocidade que a luz? E se conseguisse e olhasse pro lado será que ele veria a luz parada? Isso ele achava um pouco estranho... E lembram de um outro enigma que a gente passou na aula passada?*

A15: *O do espelho.*

P: *Isso, o do espelho. Ele pensava assim, se ele conseguisse viajar na velocidade da luz, segurando um espelho, será que ele seria capaz de ver a sua própria imagem no espelho? Qual que era a idéia, poxa, se eu to me deslocando na mesma velocidade da luz, não teria como a luz atingir esse espelho [...] Se eu to na mesma velocidade da luz, a luz ta parada em relação a mim, né? Se eu coloco um espelho na frente, a luz não vai ter como atingir esse espelho e depois voltar... Então, ele não deveria ver a sua imagem.[...]Mas ele achava isso estranho, imaginem você tá andando e a hora que você atinge a velocidade da luz a sua imagem some...*

A20: *O professor, mas eu acho que ele vai ver porque o espelho ta na frente dele.*

O professor explica porque conseguimos ver a nossa imagem em um espelho.

P: *[...] Tem uma outra coisa importantíssima que ele achava estranho, vocês lembram de uma coisa que a gente discutiu chamada princípio da relatividade?[...] Você não consegue saber se você está em movimento uniforme, ou em repouso, se você tiver dentro, por exemplo...*

A1: *Tá professor, eu estava pensando sobre isso, né? Daí eu imaginei uma roda gigante rodando ta, só contigo ta, mas rodando, mas daí eu me sentiria em constante ou em movimento?*

P: *Olha, o caso da roda gigante é um pouco diferente, porque você está num movimento circular.*

A9: *Mas só que como a velocidade é menor, pode ser que...*

[...]

A10: *Vai ter a aceleração da gravidade subindo e descendo...*

P: *É, se for bem pequena, talvez você não perceba mesmo [...]. Mas é diferente deste exemplo porque aqui é importante que você entenda que o trem está em um movimento que a gente chama de retilíneo e uniforme. Então o exemplo da roda gigante não seria a mesma coisa porque numa roda gigante, como é um movimento circular, você conseguiria saber se está em movimento, porque esse é um movimento que ta sempre acelerado [...]*

P: *Aqui, a situação que eu quero que vocês imaginem é, ele está sempre com a mesma velocidade, sempre em linha reta, sem passar por lombada, sem frear, sem acelerar sem fazer curva. Nessa situação, ele, lá dentro, [...] não deveria perceber que ele está em movimento, ou não, só sem olhar pra fora. Mas olha que estranho se a gente comparar o enigma do espelho com o princípio da relatividade: imagina que o cara tá, por exemplo, se barbeando, tá se olhando no espelho, tá? [...] E de repente esse trem, ou o caminhão, atinge a velocidade da luz. O que iria acontecer?*

A14: *Ele não ia mais se ver no espelho.*

[...]

A10: *Ele vai se cortar.*

P: *É, mas isso é estranho porque ele estaria em MRU e conseguiria saber que está em movimento. Isso fere o princípio da relatividade.*

A14: *Tá, mas a velocidade é a mesma pra todos, mas ele não está junto com o espelho, né? [...] O espelho tá na frente dele.*

P: *Sim, o espelho tá na frente dele.*

A14: *Então quer dizer que a luz tá nele e ele não tá no espelho, não é?*

P: [...] *Se ele andasse na mesma velocidade da luz, ela estaria parada em relação a ele, então essa luz nunca atingiria o espelho pra voltar...*

Esse episódio retrata a condução do segundo momento pedagógico pelo professor. Alguns alunos, como A20 e A14, demonstram dificuldade em compreender o enigma do espelho, em virtude de não dominarem fundamentos da Óptica como a reflexão da luz e a formação de imagens. Entretanto, não consideramos que estas dificuldades impeçam a abordagem desta experiência no primeiro ano do Ensino Médio, pois uma breve explicação permite que os alunos identifiquem as principais implicações deste enigma. A situação proposta por A1, abordando novamente o princípio da relatividade e indicando que ele também andava *pensando sobre isso*, propiciou uma

discussão sobre a diferença entre referenciais inerciais e não-inerciais. Isso aponta para dificuldade de compreensão do próprio movimento uniforme, uma vez que movimentos acelerados são mais cotidianos. Ao retomar o primeiro postulado, fica evidente a necessidade de uma retomada constante da discussão sobre o princípio da relatividade durante toda a intervenção, não somente em relação aos fenômenos da mecânica, para que o mesmo seja gradualmente incorporado às estruturas cognitivas dos estudantes. Objetivando constatar essa assimilação, a primeira questão do pós-teste (Anexo 13) continha uma situação envolvendo fenômenos que aconteciam no interior de uma nave em alta velocidade e questionava sobre as possíveis alterações observadas por uma pessoa em seu interior. O resultado foi expressivo: com exceção de A11 (o qual apresentou um alto índice de faltas), os demais assinalaram a opção correta e a justificaram mencionando o princípio da relatividade, o que nos permite aferir que as atividades desenvolvidas foram bem sucedidas em relação às repostas do pré-teste. Alguns alunos procuraram justificar sua opção com suas próprias palavras como A6: *Não saberia, pois não tem como saber se algo está se movendo (somente em MRU) ou está parado, pois não há nenhum fator que se altere sob essas circunstâncias.* Outros podem ter assimilado apenas o princípio da relatividade galileano, como nas palavras de A5: [...] *pois se você não sente nenhum impacto e não pode ver nada fora do avião, você não vai saber se você está em movimento ou não* e de A10: *Não há como sentir, pois dentro da nave e nas condições que a questão aborda, não existem forças atuando no corpo.* Entretanto, algumas respostas, baseadas em enunciados prontos apresentados durante as aulas - como a de A9: *Porque as leis da natureza são as mesmas parado ou em um corpo fechado em MRU* - ou vinculadas a uma lei ou princípio geral - como a de A4: *Porque há uma lei que diz: Nada que você fizer dentro de um corpo em movimento retilíneo comprovará que você está realmente em movimento retilíneo-* podem indicar

que os alunos estejam apenas cumprindo o contrato didático e respondendo o que o professor espera.

Em relação à identificação do segundo postulado, na segunda questão do mesmo teste, com exceção de três alunos (A12, A13 e A17), os quais aplicaram a adição galileana, o restante mencionou que a velocidade da luz seria a mesma para todos os observadores. Mais uma vez, as respostas idênticas ao enunciado do segundo postulado podem revelar uma não-incorporação do mesmo às estruturas cognitivas dos alunos. Porém, acreditamos que, pela própria definição de postulado¹⁶, não se esperam maiores justificativas para o mesmo. Ainda, a ampla utilização de avaliações constando de questões do tipo resposta-certa, cristalizada por anos de escolarização tradicional, não habilita ao aluno responder mais detalhadamente às questões formuladas, mesmo quando solicitado a fornecer justificativas para suas colocações.

No estudo piloto, ao tratarmos a experiência de Michelson-Morley, apresentamos uma situação análoga que envolvia a composição de movimentos. No estudo final, em função da excessiva matematização da abordagem anterior, optamos por enfatizar a interpretação ondulatória da luz, apresentando o éter como meio necessário para a sua propagação. Fizemos também uma analogia com ondas sonoras, para evidenciar que a velocidade de uma onda, medida em relação à fonte, dependeria da velocidade da mesma. Essa analogia foi proposta por um aluno durante o oitavo encontro, sendo a argumentação transcrita no próximo episódio.

¹⁶ Segundo o Dicionário Aurélio, postulado é um princípio de uma teoria aceito sem demonstração. É uma proposição não evidente nem demonstrável, a qual se admite como princípio de um sistema dedutível, de uma operação lógica ou de um sistema de normas práticas.

Episódio 11 – Analogia com o som – Fragmento do 8º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

A9: Não teria como fazer uma experiência semelhante a essa do Michelson só que com o som? Não seria mais fácil de medir?

P: Só que com o som não dá certo porque você consegue ir mais rápido do que o som..

A9: Mas que seria mais fácil de fazer seria.

A2: Um negócio que a gente estava discutindo é [...] se a luz sofreria influência do vento, em relação a um vento muito forte deslocar esse ponto de luz, esse fecho de luz, porque mexeria em alguma sombra de alguma coisa, né? Agora, o som sim, ele se propaga mais rápido a favor do vento do que contra o vento.

P: Sim, o som se propaga no ar mesmo.

[...]

A2: Eu digo isso porque eu moro aqui perto e num dia de vento norte forte a gente escuta a sirene do colégio tocar, e num dia de vento sul forte, não se ouve, quer dizer, o som não atinge a nossa casa.

P: É verdade...

A2: O som se propaga como vibração, ele mexe nas partículas de ar, já a luz não, ela não depende das partículas.

A9 percebe que, como a velocidade do som é muito inferior à da luz, a diferença entre os intervalos de tempo, medida da experiência de Michelson, seria mais facilmente observada se a mesma fosse realizada com o som. A exposição de A2, manifestando a constatação de um fenômeno presente em seu cotidiano, permitiria uma discussão mais detalhada sobre as diferenças entre o som e a luz, a qual não foi conduzida pelo professor. No ensino de Física, a Ondulatória é normalmente abordada durante o segundo ano do Ensino Médio, o que nos fez refletir sobre a participação dos estudantes nessa discussão. Entretanto, o relato desse episódio evidencia que as principais diferenças entre som e luz, também, podem ser tratadas no primeiro ano e emergem da relatividade restrita. Remete-nos também à relação custo-benefício, atribuída pelas propostas construtivistas, já mencionadas. As considerações sobre tempo despendido pela valorização da qualidade em detrimento da quantidade de conceitos ensinados em uma determinada série e grau de ensino, crítica constante na literatura (MORTIMER, 1994), são menoscabadas em função da opção epistemológica de

totalidades, patente da nossa estratégia na adoção dos Momentos Pedagógicos. Dessa forma, mesmo centrados na abordagem do conceito de tempo, permeamos diversos outros ramos da física, facilitando seu tratamento posterior.

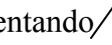
De uma maneira geral, as respostas dadas à terceira questão do pós-teste (a qual se destinava a perceber a compreensão do objetivo e interpretação do resultado da experiência de Michelson-Morley) evidenciaram um resultado aquém do obtido no estudo piloto, conforme destacado na Subseção 3.2.2. Apesar de respostas como as de A2 - *Esta experiência fio feita para tentar provar a existência do éter. Criaram um interferômetro que acusaria se houvesse mudança na velocidade da luz em duas situações, horizontal e vertical. Durante anos de testes não conseguiram atingir seu objetivo. A luz ,não muda sua velocidade e a de A4: A experiência queria provar a existência do éter, usando espelhos e um feixe de luz, mas o objetivo não foi atingido, pois a velocidade da luz é a mesma para todos* - demonstrarem uma compreensão adequada do objetivo e interpretação de seu resultado negativo, sete estudantes não mostraram compreensão alguma e muitos afirmaram, simplesmente, que ela tinha o objetivo de detectar o éter, mas que o mesmo não fora atingido, sem mencionar nada mais. Acreditamos que esse resultado possa estar relacionado com a não-realização do tratamento matemático da experiência, estratégia que, apesar do alto grau de abstração envolvido, foi utilizada e bem sucedida no estudo piloto. Na seqüência, avaliamos como o conceito relativístico de tempo é aplicado à elucidação das situações-problema inicialmente escolhidas, como também daquelas situações emergentes durante o processo de ensino.

4.3 Dilatação Temporal e Contração do Espaço - Aplicações e Resistências

O terceiro momento pedagógico da intervenção (aplicação do conhecimento) foi realizado a partir da aplicação dos postulados da relatividade para a interpretação de suas principais conseqüências, a dilatação temporal e a contração do comprimento. Partimos da problematização da experiência de pensamento semelhante ao relógio de luz, proposta como alternativa didática conveniente para um tratamento em nível médio por Daly e Horton (1994), para introduzir o problema da dilatação temporal. Percebemos a compreensão dessa experiência e os posicionamentos dos alunos no próximo episódio, transcritos na seqüência.

Episódio 12 – Experiência do relógio de luz – Fragmento do 9º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *O cara acende uma lanterna dentro de um trem, o que que ele vai ver? Ele vai ver o raio de luz subir e descer, certo? [...] Agora, quem tiver olhando de fora, vai ver o raio de luz seguindo qual trajetória?*

A9: *Essa trajetória aqui. (Representando  no ar). Mas tem uma coisa, eu acho que a diferença na trajetória não implica na distância que a luz percorre.*

A20: *Eu acho que ele veria assim. (Representando a mesma trajetória, mas em sentido contrário).*

[...]

P: *Para trás?*

[...]

A14: *É que nem a bola de basquete né? Mesmo a luz que é rápida, ainda faz diferença.*

P: *É que nem a bola de basquete, se eu lanço a bola de basquete e seguro, se eu estiver andando vocês vão ver a bola fazer isso aqui  [...] Vocês concordam que para vocês que estão vendo de fora, parece que a luz percorre uma distância maior ou menor?*

A9: **Parece** ser maior, mas é a mesma.

A18: (Simultaneamente) *Parece ser maior, mas não é.*

A2: *Eu acho que é a mesma, porque no caso de uma bola dentro de um caminhão eu jogar para cima e pegar ela, ela subir um metro e descer um metro, embora pra mim a trajetória dela por ser diferente me dê uma visão de uma distância maior, só que ela tá percorrendo um metro de altura e descendo um metro.*

A14 se manifesta, mas não é possível transcrever.

P: *Ela tá subindo um metro, descendo um metro e andando 5 metros na horizontal.*

A2: *A impressão que dá para mim é que ela tá percorrendo um percurso maior, mas seria só uma impressão. Pra quem tá realmente lançando a bola, ela vai estar percorrendo esse um metro.*

P: *Tá certo, então pra quem tá dentro ela vai subir e descer, mas você concorda que quem está fora vê a bola percorrer uma distância maior?*

A2: *Sim*

P: *Então, é isso só que eu quero dizer.[...] Depende do referencial mesmo [...], quem tá dentro do trem vai ver a luz subir e descer e quem tá fora vai ver a luz subir, descer e andar para frente também.*

A7: *Então a distância é maior.*

P: *A distância é maior.*

A1: *Mesmo porque o trem está em movimento né?*

P: *Mesmo porque o trem está em movimento, se o trem não estivesse em movimento, a pessoa ia ver a mesma coisa.*

A9: *Pra quem tá dentro do trem, veria ela andando isso aqui | | mas ela percorreria \wedge a mesma coisa, a mesma distância.*

A1: *Eu acho que não.*

A7: *Eu também acho que não.*

A9: *Eu acho que sim, porque ela tá andando os mesmos 5 metros pra lá e...*

P: *Sim, mas é que são visões diferentes.*

A9: *Sim, mas não implica na distância.*

P: *Pra quem tá vendo de dentro, a luz só sobe e desce, porque ele está dentro do trem, então ele não sabe que o trem está em movimento em relação a outra pessoa, entendeu?*

A experiência de pensamento, descrita nesse episódio, consiste em uma situação, didaticamente criada, para que os estudantes possam perceber a dilatação temporal como consequência do segundo postulada. A dedução matemática de sua expressão, a partir da aplicação do teorema de Pitágoras, evidencia sua complexidade. No episódio descrito, os estudantes manifestam que a trajetória da luz, quando observada pelo observador localizado fora do trem, tem um comprimento maior, porém, associam essa diferença a um efeito aparente, e não real. Diversos alunos, liderados por A9, expõem seus posicionamentos a favor dessa noção e pugnam um debate, mediado pelo professor. A14 recorre a uma situação da mecânica, mais familiar à sua estrutura cognitiva, para buscar uma analogia com a experiência. Os argumentos de A2, A7, A9 e A18 refletem a crença em um referencial privilegiado para a descrição dos movimentos, resultado consistente com o de outros autores (VILLANI e PACCA, 1990; SANTOS,

1986). A noção de realidade é associada a este referencial, enquanto para os demais trata-se apenas de um efeito aparente. Essa concepção figura, ao nosso ver, como um obstáculo epistemológico para a compreensão do fenômeno de dilatação temporal e da própria teoria da relatividade, uma vez que, para a mesma, a descrição do movimento pode ser feita por quaisquer referenciais inerciais e não por algum em especial. Na medida em que essa idéia é contra-intuitiva, a plausibilidade de sua argumentação parece ser uma etapa decisiva na evolução conceitual. Nesse sentido, o professor optou por recorrer a argumentos racionais, explorando matematicamente a relação do segundo postulado com a consequente dilatação temporal, a partir da experiência descrita. A resistência dos estudantes à mudança de suas concepções de tempo absoluto é transcrita no episódio 13, na seqüência.

Episódio 13 - Dilatação temporal e segundo postulado - Fragmento do 9º Encontro CD2
Legenda: P – o autor e professor
An – alunos

P: [...] *A velocidade é a mesma coisa, é a velocidade da luz. Pro A ela percorre uma distância maior, gente se a distância é maior, para dar a mesma velocidade, o que que tem que acontecer aí?*

A9: *Tem que levar um tempo maior.*

A14: *Um tempo menor.*

A9: *Maior!*

[...]

Confusão de vozes... Opiniões diversas

P: *Vamos fazer uma conta aqui: 4 sobre 2, isso dá 2 certo? [...] Se eu quiser que esta conta continue dando 2, se eu aumentar esse cara aqui (o numerador) por exemplo pra 8.*

A6: *Tem que aumentar aquele ali também...*

P: *Tem que aumentar esse aqui de baixo também.*

A9: *Aumenta pra 4.*

[...]

P: *Então qual é o problema desse postulado aqui. Olha, se a velocidade da luz é a mesma e ela percorre uma distância maior pro A, ela tem que levar mais tempo pro A. [...] Ou seja, o tempo passa de uma maneira diferente pro A e pro O. Um segundo pro O, não é um segundo pro A. [...] Se ele falar que a velocidade é absoluta, então eu tenho que mexer no tempo, então o tempo que tem que ser relativo.*

A9: *Exatamente!*

P: *Complicado isso aí?*

A14: *Aham (concorda, gesticulando)*

A9: *Complicado pensar, mas...*
A6: *Pra aumentar a velocidade...*
A9: *Não, a velocidade é a mesma!*
P: *O problema é que todos vêem a luz se deslocando com a mesma velocidade.*
A6: *Pois é, então como que vai aumentar o tempo?*
A7: *Tá, no caso ali é uma situação só, no mesmo momento que eu tô vendo, a pessoa que tá dentro vai estar vendo.*
P: *Exatamente.*
A7: *E vai levar tempos diferentes?*
P: *Vai levar tempos diferentes. Engraçado isso, né? [...]*
A7: *É!!!*
P: *É isso mesmo que o Einstein diz, o tempo é relativo!*
A14: *Depende de quem tá olhando...*
P: *O tempo é relativo, depende do referencial. [...] Você pode ter certeza que a primeira vez que eu vi as idéias dele eu também achei: tá louco!!!*
A7: *É!!!*
P: *Não só eu, ele na época que publicou isso aí, foi tachado de lunático, de maluco. [...] Quando passa um segundo pro O, por exemplo, quando o A observa passa mais de um segundo.*
A9: *Dois.*
P: *Depende, do que?*
A6: *Do referencial.*
A4: *Da velocidade.*
P: *Depende da velocidade do trem e a gente já vai achar uma fórmula pra calcular isso.*

A relação de proporcionalidade entre deslocamento e tempo é explorada, levando à necessidade da dilatação temporal como consequência da experiência. A ênfase dada ao caráter relativo do tempo, ou seja, ao fato de que sua medida depende do referencial, na condução da exposição, permite destacar a dimensão dessa interpretação e a significativa diferença ontológica em relação à visão de tempo da teoria clássica. Com isso, almejava-se que os estudantes reconhecessem a perturbação. Desde o primeiro momento, A7 demonstra assimilar o que está sendo proposto, porém discorda de que isso possa realmente acontecer. Para A9, porém, a noção de tempo relativo parece ser mais plausível em virtude das evidências apresentadas pelo professor, indicando uma internalização da argumentação. A9 arrisca um valor numérico para o

tempo medido pelo referencial de fora e a relação de dependência entre a dilatação do tempo, e a velocidade do móvel aparece naturalmente na resposta de A4.

Constatamos que alguns alunos, entre eles A20, não conseguiram abstrair a situação proposta e visualizar sua consequência. Assim, em um outro momento deste encontro, apresentamos uma animação¹⁷, simulando a situação. A apresentação da animação e o conflito gerado pela introdução da noção de tempo relativístico são descritos no décimo quarto episódio de ensino.

Episódio 14 – Animação e dilatação temporal – Fragmento do 9º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *Um raio de luz sobe e desce. Esse trem tem só 900 mil quilômetros de altura...*

A14: *Só?*

P: *Só. Ele leva seis segundos pra subir e descer. E se o trem aumentar a velocidade, se ele for para 240 mil quilômetros por segundo, vai ter alguma diferença no tempo?*

A9: *Sim.*

P: *Pro cara que tá dentro não, né? Ele vai continuar subindo e descendo. Porque pelo princípio da relatividade, tudo que acontece no interior do trem acontece como se o trem estivesse parado. Então, não importa, a luz vai subir e descer igualzinho.*

A8: *É uma pergunta.*

[...]

P: *Não, não, vou fazer que nem os professores do Einstein: você presta atenção, eu tô certo e você está errado!*

Risos

A8: *Ali subiu e desceu demorou 6 segundos. Como é que, se caso ele tiver vindo daqui, ele vai, com o trem a 240 mil quilômetros por segundo, como é que vai demorar 10 segundos se a trajetória é a mesma, se a velocidade é a mesma?*

A6 e A7: *É!!!*

P: *A trajetória não é a mesma.*

A8: *Não, aí ele tá em movimento...*

P: *Pro cara que vê de fora a trajetória não é a mesma.*

A8: *Pra quem vê de fora, tá. Mas é uma impressão que deu 10 segundos ou dá isso mesmo.*

P: *Pro cara que tá fora, realmente, olhando o cara que tá dentro, não vai ser uma impressão. Se ele for medir, ele vai medir um tempo de 10 segundos mesmo. Não é uma impressão.*

¹⁷ Essa animação pode ser encontrada em www.novaescola.com.br
http://revistaescola.abril.com.br/edicoes/0181/aberto/mt_64054.shtml

A6: *Mas como que o tempo continua o mesmo se a distância aumentou?*

P: *Olha só, pro cara que tá dentro a distância não aumentou [...] a luz subiu e desceu. O tempo vai ser diferente pro cara que está fora e aí, por isso que depois [...]*

A animação é executada. A trajetória do raio vista por uma pessoa fora do trem é mostrada.

[...]

A14: *No caso a luz não reflete no espelho. Ou reflete no espelho lá atrás?*

P: *A luz reflete no espelho.*

[...]

Encontramos, na literatura específica (ROSA, 1995; SOUZA, BASTOS e ANGOTTI, 1999; NOGUEIRA *et al.*, 2000), discussões pertinentes sobre a real utilidade de recursos computacionais, como *softwares* educativos, para a aprendizagem de conceitos da Física. A ilusão de que a inserção de computadores em sala de aula solucionaria os problemas educacionais é questionada pelos autores, os quais enfatizam a importância de uma formação docente específica, para que os professores façam o uso proveitoso e consciente desses recursos e reconheçam suas limitações. Em relação à utilização de simulações computacionais com fins didáticos, Yamamoto e Barbeto (2001) apontam

É claro que um *software* por si só pode não funcionar como um estímulo à aprendizagem. O sucesso irá depender da integração do mesmo ao currículo e às atividades desenvolvidas em sala de aula. No entanto, uma vez realizada de forma consciente, a utilização de simulações no lugar de experimentos reais pode ajudar, e muito, na compreensão de certos fenômenos físicos (YAMAMOTO e BARBETA, 2001, p. 215).

Nesse sentido, o uso do recurso audiovisual, neste episódio, teve como objetivo possibilitar uma visualização da experiência, dado o elevado grau de abstração demandado por sua idealização. A abordagem numérica inicial possibilitou a instauração de uma perturbação lacunar, uma vez que os alunos identificaram a falta de informações para generalizarem a relação entre a velocidade e a dilatação temporal. Essa sistematização foi oportunizada pela dedução, via teorema de Pitágoras, da equação que permite relacionar os tempos medidos pelos dois observadores. Visando a

uma familiarização com essa expressão e também a destinar mais tempo ao terceiro momento pedagógico (deficiência detectada no estudo piloto), fizemos uma análise quantitativa da mesma através do cálculo de γ para vários valores de velocidade e interpretamos seu significado, aplicando-o à situação do paradoxo dos gêmeos. A condução dessa atividade e a reação dos estudantes diante dos resultados obtidos são transcritas no episódio 15, a seguir.

Episódio 15 - Análise numérica e paradoxo dos gêmeos - Fragmento do 9º Encontro CD2
Legenda: P – o autor e professor
An – alunos

P: *Se a velocidade da nave for muito menor que a velocidade da luz, o que normalmente é o que acontece,... olha aqui ó, se esse cara v for muito menor do que c , essa divisão aqui é quase zero...*

A14: *Aham*

P: *Se essa divisão é quase zero, isso aqui vai dar quase a raiz de um mesmo. Raiz de um é um, então significaria o seguinte: se a velocidade da nave for muito menor que a velocidade da luz, o gama é quase um. [...] É quase que imperceptível essa diferença de tempo. Porque ela é muito pequena, mas ela não é nula, pode ser que lá na casa nos nanossegundos... [...] Suponha que a nave se desloque com a metade da velocidade da luz (150000km/s). Se você fizer a conta do gama, ela dá 1,07. [...] Isso significa o seguinte: se pro O passa 1 segundo, pro A passa quanto?*

A9: *1,7*

P: *1,07 segundos. Não é uma coisa assim tão fácil de perceber, mas pensa em um ano, pro O passou um ano, pro A passaria 1,07 de ano, dá um ano e uns 20 dias. Olha só, se o cara que ta dentro da nave viajar com uma velocidade de metade da velocidade da luz durante um ano, o que para ele vai ter parecido um ano, pro cara que ficou na Terra foi um ano e vinte dias. A7: Tá mas pra ele vai ser um ano, ou...tá eu acho que...vamos supor que ele saia no ano de 2000 chega no ano de 2001. Ele vai chegar e pro cara vai ser o ano de 2001 mais vinte dias?*

P: *Exatamente.*

A7: *Tá ele vai chegar e vai ter passado um ano e vinte dias?*

P: *Exatamente.*

[...]

A14: *Por isso que você colocou aquele Brad e Pitt.*

P: *Isso! Vou acelerar a nave. 80% da velocidade da luz, o gama dá 1,67. Significa o que? Se passar uma ano pro cara que ta dentro da nave, passa quanto pra quem ficou na Terra? [...]*

A9: *1,67. Um ano e meio*

A7: *Tá, ele vai chegar e vai ter passado um ano e meio!*

P: *Exatamente.*

A9: *Vai ter passado meio ano.*

A8: *Vai ter passado um ano e meio, mas só que pra ele parece que passou um ano.*

[...]

A7: *Parece que passou um ano, mas passou um ano e meio.*

A14: *O professor, então também a luz envelhece a pessoa?*

A2: *O relógio dele marcaria um ano. [...] E o que ficou na Terra marca um ano e meio.*

P: *Vamos acelerar isso aí? 99% da velocidade da luz. O gama da 7,1. Agora ta mais legal ó... Passou um ano pro cara na nave, quantos passaria pro cara da Terra.*

A9: *7,1*

[...]

P: *O cara ta dentro da nave, ele sai viajando... Passou um ano pra ele, quando ele voltou aqui já se passaram 7 anos.*

A7: *Tá, mas passou sete anos pra ele também. Ele não vai chegar aqui...*

[...]

A8: *Chega lá envelhecesse sete anos, vai ficar?*

Confusão de vozes

A10: *Se eles levassem um relógio de pulso, por exemplo, o relógio iria acelerar?*

P: *Ele não consegue perceber isso pelo princípio da relatividade.*

A7: *Mas vai acelerar?*

Confusão de vozes

A14: *Eu vou até sonhar com isso hoje...*

A abordagem numérica evidencia a importância da linguagem matemática, uma vez que, através da mesma, é possível avaliar os efeitos relativísticos, cada vez mais significativos à medida que a velocidade da nave se aproxima da velocidade da luz. O professor chama para si a responsabilidade de elucidar a argumentação para o modelo relativístico e destaca que, apesar de podermos desprezar os efeitos previstos pela teoria para as velocidades cotidianas, isto não significa que eles inexistam. A7 insiste em manifestar a irracionalidade dos resultados apresentados, fortemente arraigado à sua concepção de tempo absoluto, identificada no pré-teste. A2 busca uma relação com o relógio, condescendo com a concepção empirista de tempo. A dicotomia entre o real e aparente se manifesta mais uma vez na colocação de A8. O envolvimento dos estudantes na exposição da situação do paradoxo dos gêmeos reforça o caráter motivador e acertado da discussão.

Segundo Terrazzan e Auler (1996), os conhecimentos transformados em conteúdo escolar devem permitir a elucidação das situações-problema inicialmente escolhidas, como também daquelas situações emergentes durante o processo de ensino. Cientes de que a dilatação temporal ainda precisava ser mais abordada, em virtude de seu caráter contra-intuitivo, e por ter sido elencada como um conceito central para a análise da evolução dos perfis conceituais de tempo dos estudantes, no décimo encontro, retomamos a análise numérica, porém, desta vez, optamos por fazer minuciosamente com os alunos o cálculo de gama para uma velocidade de $0,8 c$. Os estudantes demonstraram alguma dificuldade com as operações fundamentais envolvendo números decimais e as mesmas foram sendo retomadas quando necessário. O uso da calculadora se mostrou eficaz e foi incentivado. Retomando a situação proposta na sexta questão do pré-teste (Anexo 8), esperávamos que os alunos a reinterpretassem. No décimo sexto episódio, este momento é descrito; as colocações dos estudantes, a importância da interação entre os pares, a retomada do princípio da relatividade e a assimilação da teoria por alguns são aspectos analisados posteriormente.

Episódio 16 - Relatividade para pequenas velocidades - Fragmento do 10º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: [...] *ai o Brad respondeu: Exercícios diários, alimentação saudável e viagens em altíssima velocidade. Era uma espécie de piada relativística... [...] Mas hoje isso aqui eu espero que faça um pouco mais de sentido, ó: viagens em altíssima velocidade fazem com que o tempo passe mais devagar.*

A7: *Agora eu consegui entender, mas não acredito ainda.*

A1: *Essa imagem aí parece uma montagem, na verdade...*

Risos

A9: *É uma montagem!!!!*

[...]

P: *Por que que isso não pode ser feito com seres humanos até hoje?*

A2: *Por causa da velocidade que a gente já atingiu.*

P: *É, porque a gente não chega nem perto da velocidade da luz. Lembram daquela tabela de velocidades?*

A14: *Não tinha nem como né. Uma pessoa entrar dentro de uma nave e andar nessa velocidade?*

[...]

P: *Porque a gente não conseguiu desenvolver um mecanismo que consiga acelerar uma nave a uma velocidade tão alta.*

A14: [...] *Tipo a pessoa não estaria confortável dentro de uma nave que voe nessa velocidade.*

[...]

P: *Eu concordo com você que a pessoa não estaria confortável no período em que ela estivesse acelerando*

A14: *Tá, mas eu acho que se ela tiver andando na velocidade da luz, nem um corpo vai enjoar, vai sentir?*

P: *O que que vocês acham?*

A9: *Não sente.*

A14: *Mas a velocidade da luz é muito muito muito, se saísse da Terra do nada, e já saísse a essa velocidade..*

Alunos falam simultaneamente. A2 explica para A14 o conceito de aceleração e diz que um corpo não pode atingir a velocidade da luz imediatamente.

A2: *Ela não pode estar vindo do zero até a velocidade da luz [...] A aceleração é progressiva.[...] É igual o lançamento de um foguete ou a decolagem de um avião, a aceleração é progressiva, depois que atinge.*

A1: *Eu acho que nessa velocidade aí de 99,9, ao mesmo tempo que ela é muito rápida, ela é muito devagar. Pra poder passar um ano mais, tantos anos... Ela é rápida, mas ao mesmo tempo parece eu não tem nenhuma velocidade.*

A2: *Como o X43, ele atinge 7700km/h, mas ele não parte a 7700, ele parte do zero, um dois e vai aumentando progressivamente até atingir...*

P: *Tá certo, mas o que que a gente viu na primeira aula? Esse princípio da relatividade ele tem que estar permeando.*

A14: *Que um corpo em movimento, ele continua em movimento...*

A2: *Até poderia ser feito um cálculo, vamos dizer com um foguete de 18300km/h, e ver a porcentagem que é da velocidade da luz, seria 0,0000000..., em um ano nessa velocidade talvez se passasse dois, três segundos a menos (olhando para A14), mas seria imperceptível.*

A9: *Talvez na sonda ali ó. Talvez na sonda seja maior. (apontando para a velocidade da sonda Helios na tabela)*

P: *Vamos calcular da sonda Helios então? Teve um monte de perguntas agora, vamos responder uma de cada vez. O que A14 falou, eu gostaria de te lembrar o seguinte, o princípio da relatividade diz que você não consegue saber se você está em movimento retilíneo e uniforme ou em repouso, é a mesma coisa, então por exemplo, se você tivesse dentro de uma nave que se desloca a 99,9% da velocidade da luz, se ela tivesse indo sempre com essa velocidade, você não perceberia dentro da nave.*

A14: *Mas como professor?*

P: *Olha só, a gente está parado ou a gente está em movimento? Nós aqui na Terra?*

A14: *Referente a que?*

P: *Então, a gente tá parado em relação à Terra, mas a gente tá, olha a nossa velocidade de translação, 108000km/h, nós estamos dentro de um veículo que se desloca com uma velocidade de 108000km/h em relação ao Sol e a gente não percebe. A gente solta alguma coisa, ela cai na nossa mão, tudo*

que a gente faz aqui na Terra, é exatamente a mesma coisa como se a Terra estivesse parada, ou seja, estar parado ou estar em MRU é a mesma coisa. É só uma questão de referência.

A14: Tá, e não muda no corpo, uma pessoa que está acostumada na Terra, nesta velocidade, de repente vai pro espaço e voa na velocidade da luz, não muda a cabeça da pessoa, nada, nada?

A10 e A9 contrapõem A14 simultaneamente.

A9: Não muda... (aponta para a tabela)

A10: Até um piloto não consegue perceber isso num avião!

P: Pelo princípio não.

A14: Ai... Resmungo em discordância

A9: Senão a gente se incomodava dentro de um avião que tem velocidade menor.

A1: Pela Física não,

A14: É, pela Física não, mas

A1: Tem dúvida

A14: Pela Física você não sente nada nada, né?

A1: É, pela Física, mas pela experiência digamos...

Confusão de vozes...

Esse episódio se destaca pela diversidade de aspectos fundamentais para a análise dos resultados obtidos no estudo final. A7 demonstra compreender a dilatação temporal, apesar de não acreditar que ela ocorra na prática, esboçando a consciência da manutenção de suas concepções. A2 responde acertadamente, evidenciando ciência da não-percepção dos efeitos relativísticos em nosso cotidiano devido às baixas velocidades. A14 associa a impossibilidade de se aproximar da velocidade da luz com alterações provocadas no organismo de uma pessoa no interior da nave, relutando a aceitar o princípio da relatividade para altas velocidades. Esse resultado é semelhante ao obtido por Pietrocola e Zylbertszajn (1999) e indica que os estudantes tendem a não reconhecer a validade do princípio da relatividade para velocidades próximas à da luz, devido ao alto nível de abstração exigido pela situação. A dificuldade de abstração e de generalização figura, dessa forma, como obstáculo epistemológico. Segundo Mortimer (1994), esse obstáculo está associado aos aspectos perceptivos dos fenômenos analisados, enquanto o modelo usa estruturas subjacentes, as quais permitem a identificação de similaridades entre fenômenos aparentemente diversos. A14 se recusa a

abandonar suas concepções apenas pelo papel social do professor, uma vez que ele encontra muito mais evidências contrárias em sua estrutura cognitiva fortemente influenciada por experiências cotidianas.

Ainda, A2 propõe uma situação, demonstrando concordar com a visão epistemológica de Kuhn, quando o mesmo afirma que o conceito de tempo da relatividade é ontologicamente distinto (incomensurável) do tempo da mecânica clássica. A sugestão do aluno é analisada posteriormente em um outro episódio.

Uma questão central para a análise desta transcrição é a importância da interação entre os pares para a construção social do conhecimento no ambiente de sala de aula. Em alguns momentos, percebemos os alunos explicando uns para os outros, como quando A2 menciona a A14 que existe um período de aceleração que antecede a velocidade próxima à da luz, ou quando A10 e A9, simultaneamente, argumentam que não são percebidas as diferenças sugeridas por A14 no interior de um avião em movimento. Momentos como esse evidenciam a pertinência do referencial teórico adotado. A análise de fenômenos do universo escolar aponta para a importância da diversidade dos estudantes, conforme afirma Rego (1995),

a heterogeneidade, característica presente em qualquer grupo humano, passa a ser vista como fator imprescindível para as interações na sala de aula. Os diferentes ritmos, comportamentos, experiências, trajetórias pessoais, contextos familiares, valores e níveis de conhecimento de cada criança (e do professor) imprimem ao cotidiano escolar a possibilidade de troca de repertórios, de visão de mundo, confrontos, ajuda mútua e conseqüente ampliação das capacidades individuais (REGO, 1995, p. 110).

Nessa perspectiva, para desencadear esse tipo de processo, é necessário que o aluno internalize, segundo Mortimer (1994), aspectos como cooperação, respeito mútuo, clareza na exposição das idéias e abertura para idéias divergentes. Não é uma tarefa fácil, tendo em vista o contexto tradicional da educação escolar, no qual a participação do estudante só é valorizada quando as colocações do mesmo estão em conformidade

com as do professor. No próximo episódio, descrevemos uma abordagem sobre a magnitude da velocidade da luz e percebemos mais uma vez a manifestação das diferenças entre o conhecimento dos estudantes através de suas interações.

Episódio 17 - Magnitude da velocidade da luz - Fragmento do 10º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *Gente, qual é a velocidade da luz em quilômetros por hora?*

A14: *Trezentos*

A1: *Três mil*

A9: *Um bilhão...*

A7: *Um bilhão e oitenta milhões...*

Confusão de vozes

A10: *Trezentos mil quilômetros por segundo*

P: *Trezentos mil quilômetros por segundo, pra você passar para quilômetros por hora, você multiplica por 3600.*

A14: *Ta, trezentos mil quilômetros por segundo, a velocidade da luz? Trezentos mil quilômetros por segundo. Trezentos mil quilômetros por segundo.*

A2: *Um bilhão e oitenta milhões...*

P: *Isso dá... a luz dá sete voltas e meia na Terra em um segundo, dá isso. Sete voltas e meia na Terra em um segundo.*

A1: *Poxa!!*

P: *Muito alta né? [...]*

A1: *É impossível de saber se isso foi medido de verdade professor.*

A14: *Eu acho que não. Sinceramente...*

Confusão de vozes

P: *Gente, você só precisa ter algo que consiga medir um intervalo de tempo muito pequeno e você tenha uma distância muito grande. Os relógios atômicos medem nanossegundos.*

A1: *Será? [...]*

A14: *Mas como é que eles conseguiram saber dá sete voltas na Terra em um segundo?*

A10: *Eles mediram matematicamente.*

P: *Eles pegam a distância e dividem pela velocidade.*

A14: *Eles mediram tudo, certinho? Ah não...*

Confusão de vozes... A10 chama A14 e tenta explicar... Muitos alunos falando simultaneamente... Vários discutindo sobre essa possibilidade...

A10: *O satélite olha lá de cima e mede, acabou.*

A14: *Mas ninguém sabe qual é a medida do planeta...*

A10: *Existe uma escala...Ele ta olhando a Terra, ela tá pequeninha lá, ele tira a medida e coloca na escala...[...] A luz A14... Ele já explicou isso em outras aulas... A experiência da velocidade da luz...[...] Seguinte ó, acende a luz e sai correndo atrás... e vai olhando no relógio.. quanto tempo ela vai parar...*

Quando o professor menciona a distância percorrida pela luz em um segundo, relacionando-a com o comprimento da Terra, elucidando a magnitude de c , A1 e A14 manifestam a forte influência do perfil empirista em suas concepções. Para eles, o valor *sete voltas e meia*, mencionado pelo professor, estaria associado à realização de alguma experiência. Por outro lado, A10 já demonstra prevalência de uma concepção racionalista, uma vez que consegue determinar *matematicamente* a distância percorrida pela luz. O debate travado por A10 e A14 no final do episódio reflete a tentativa do primeiro em ampliar a visão do segundo. O professor, naquele instante, conversa com outro aluno e nem se dá conta dessa interação, a qual só foi detectada assistindo às gravações posteriormente.

Objetivando oferecer uma multiplicidade de caminhos cognitivos, o cálculo proposto por A2 no Episódio 16 (*Até poderia ser feito um cálculo, vamos dizer com um foguete de 18300 km/h, e ver a porcentagem que é da velocidade da luz, seria 0,0000000..., em um ano nessa velocidade talvez se passasse dois, três segundos a menos, mas seria imperceptível*) foi retomado pelo professor, estrategicamente, em um momento posterior, e é descrito no Episódio 18. Atendendo a sugestão de A9 (*Talvez na sonda ali ó. Talvez na sonda seja maior*), também transcrita no Episódio 16, o professor calculou o valor de gama para a sonda Helios e interpretou o significado de seu resultado juntamente com os alunos. O caráter intencional dessa ação educativa fica à mostra, à medida que essa promoção signifique modificar o pensar e agir dos sujeitos por meio da aprendizagem.

Episódio 18 – Gama para a sonda Helios – Fragmento do 10º Encontro

CD2 Legenda: P – o autor e professor

 An – alunos

P: *Pediram para eu calcular quanto por cento da velocidade da luz corresponde essa velocidade aqui (apontando para sonda Helios). Que conta que a gente faz? Eu vou dividir a velocidade da sonda Helios, eu tenho uma calculadora aqui, que é de 252800km/h, vocês podem fazer aí, dividido pela*

velocidade da luz que é 1080000000km/h. Na calculadora científica deu um número assim: $2,34^{-04}$ o que significa isso?

A7: na menos...

P: Isso, que é vezes dez elevado a menos quatro.

A10: 0,000234

P: Então a velocidade da sonda Helios é igual a 0,0234 por cento da velocidade da luz.

A9: Uh

A14: Não é nada

P: Não é nada, mas é a maior velocidade já registrada por uma sonda na história... Vamos calcular o gama agora, [...] vamos voltar para aquela fórmula lá... É só a gente fazer assim ó, a raiz de um menos a porcentagem da velocidade da luz ao quadrado. Tenho que fazer 0,000234, eu tenho que elevar isso ao quadrado, dá uma coisa bem pequena, daí eu tenho que fazer um menos esse valor que eu achei, [...] isso vai dar quase um. [...]

A8: Então professor, quanto mais perto do um, menor o...

P: Menor a velocidade.

A9 faz em sua calculadora

P: Isso deu 0,999999945, aí eu tiro a raiz disso e inverte...então anotem aí, o gama da sonda Helios da 1,000000027. O que significa isso?

A1: Bem mais que o esperado....

A14: Bem menos né.

A9: Bem menos.

A2: Um bilionésimo. Seria dividir 365 por um bilionésimo

P: Se passar um segundo pro cara que ta dentro da sonda Helios, passa 1,000000027s para quem ta aqui na Terra.

A14: Ele fica novo em alguns segundos quando chega aqui.

A2: Um ano nessa velocidade talvez já desse meia hora, vinte minutos... uma coisa assim que seria uma fração insignificante né

P: Vamos fazer a conta?

A7: É aula de física, não de matemática!

P: Mas, muitas vezes você não tem como desvencilhar uma da outra. A matemática é a linguagem da física.

A14: Então quem andar nessa coisa aí, economiza uns segundos né, quando chega aqui? Porque somando tudo isso assim, tudo que tá passando aqui na Terra, dá uns segundos...

P: Pra fazer a conta que o A2 falou é o seguinte, se passar um ano na sonda Helios, passou quanto tempo a mais aqui, qual seria o atraso, tá? Se a sonda Helios ficou nessa órbita durante um ano, nessa velocidade e voltou pra Terra, o relógio da sonda Helios ta atrasado em relação ao relógio que ta aqui, quanto tempo. [...]

P: Vamos fazer essa conta então: 0,000000027 vezes 365 eu tenho quantos dias, vezes 24 quantas horas, vezes 60 eu tenho quantos minutos e aí mais uma vez vezes 60 eu tenho em segundos... Gente, deu, em uma ano, dá um atraso A2 de bem menos do que você achava... Da 0,85 segundos, não dá um atraso de nem um segundo.

A14: Em um ano!![...]

A2: É um negócio insignificante.

A9: Mas, já é alguma coisa.

A14: Imagina a velocidade para dar um atraso de 7 anos...

A partir da solicitação inesperada de A2, considerando a velocidade da sonda Helios, o cálculo de gama evidenciou a importância de uma perspectiva interdisciplinar na interpretação do significado da generalização representada por uma equação. Inicialmente, o próprio A2 arrisca um resultado, mas percebe que a resposta pode ser obtida mediante substituição dos valores na fórmula. Destaca-se, mais uma vez, a adequação de um tratamento matemático para a compreensão dos conceitos trabalhados. A7 chega a criticar a atividade, possivelmente influenciada pela característica fragmentária do currículo da grande maioria das escolas.

Com o objetivo de apresentar evidências experimentais e verificar se os estudantes aplicariam a noção de dilatação temporal, construída durante o processo, para explicarem os resultados das experiências conflitantes como a de Hafele-Keating (exposta no terceiro encontro) e a detecção de múons (problematizada no quarto), estas experiências foram retomadas no final do décimo encontro. Descrevemos, no episódio 19, a retomada da experiência dos múons e a explicação dos estudantes para o seu resultado.

Episódio 19 – Evidências experimentais – Fragmento do 10º Encontro

CD2 Legenda: P – o autor e professor

 An – alunos

P: *Gente, pergunta aqui para fechar, poderíamos detectar, sim ou não?*

A7: *Não*

A9: *Matematicamente não. Mas ,sim..*

P: *Matematicamente não, mas se detecta, por quê? [...]. Então, matematicamente não, porque eles iam percorrer 600m e ia se desintegrar, eles nunca chegariam ao nível do mar. Mas [...] cientistas detectaram um monte de múons chegando no nível do mar. E eu quero que vocês me ajudem a explicar por que?*

[...]

A2: *Porque o rompimento não foi no início da atmosfera.*

P: *O rompimento foi lá a dez quilômetros de altura.*

A14: *Porque podia ter algum buraco...*

P: *Não também, por quê?*

A7: *Porque ele está próximo da velocidade da luz.*

P: *Porque ele ta próximo da velocidade da luz, e daí?*

A7: *E daí que o tempo não passa... Seria isso?*

Alunos: *É... Ah... Talvez sim...*

P: *Olha lá, ele ta quase na velocidade da luz, não está? Dois microssegundos são dois microssegundos pra ele.*

A15: *Pra nós...*

P: *Pra nós é mais do que isso, não é?*

A7: *É...*

P: *Como ele ta quase na velocidade da luz, o gama pra ele dá uns 20. [...] Significa o que, dois microssegundos é o tempo que ele leva, pra ele, pra nós leva mais tempo, leva 20 vezes mais o que o possibilitaria a percorrer uma distância 20 vezes maior. 20 vezes 600 dá quanto? 12000, ou seja 12 km e ele chegaria. É uma evidência experimental, a gente só detecta esses mésons na superfície da Terra, porque o tempo é relativo [...]*

A7: *Eu entendi, mas eu ainda não acredito.*

[...]

A9: *Eu acredito, mas não...*

Inicialmente, os estudantes, a exemplo de A2 e A14, persistem em coligir justificativas que expliquem o resultado através da noção clássica de tempo absoluto. Porém, A7 já demonstra aplicar a dilatação temporal para a interpretação da situação proposta. Imediatamente, vários estudantes se manifestam em concordância com o apontamento feito por A7, evidenciando que também o consideram plausível. Finalmente, o mesmo aluno A7 esclarece que, apesar de entender as implicações deste conceito, não acredita que ele realmente ocorra, mesmo diante das evidências. Pudemos notar que o uso de situações problemáticas e potencialmente perturbadoras assegura a tomada de consciência, pois esse tipo de situação exige o emprego consciente das noções. Por essa razão, pensamos que as atividades promoveram uma ampliação da forma como os estudantes interpretam a realidade à sua volta.

Nessa perspectiva, buscando discutir um outro resultado intrigante previsto pela relatividade, abordamos, no último encontro da intervenção, a contração do comprimento. As reações dos estudantes a este outro fenômeno e o questionamento sobre realidade e sentimento de realidade, conduzido pelo professor, são apresentados no vigésimo episódio, na seqüência.

Episódio 20 – Contração do comprimento – Fragmento do 11º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: *Se uma régua tem um comprimento de um metro quando ela está parada em relação a mim, se ela passar por mim com uma velocidade de 80% da velocidade da luz, ela vai parecer que tem quantos centímetros?*

A2: *60 centímetros*

P: *60 centímetros, ou seja 60% do comprimento que você mediu quando ela estava parada.*

A9: *Então se você chegar na velocidade da luz ela some!*

[...]

P: *Se for na velocidade da luz ela some.*

[...]

A14: *Não some né, tu só vê um risco. Ela não desaparece lá...*

A10: *Professor? Então teoricamente a gente ficaria menor, nosso corpo ficaria muito menor?*

P: *Você fez uma boa pergunta! A10 comentou um negócio que eu quero conversar com vocês. [...] Será que vocês se perceberiam ficando mais magros? [...] Olha só, você tá dentro de uma nave e tá olhando um relógio. E, em relação a Terra, você está a uma velocidade de 99% da velocidade da luz. Se você olhar para esse relógio, você vai perceber que esse relógio tá atrasando? Sim ou não?*

A9: *Como assim?*

A4: *Não*

A9: *Atrasando não.*

P: *Você vai perceber que o seu relógio está andando mais devagar?*

A14: *Com certeza.*

A8: *Acho que não*

A4: *Não*

P: *Por que não?*

A14: *Como ele tá na velocidade da luz...*

A8: *Porque ele tá na mesma velocidade né?*

A4: *Porque tu também tá atrasando.*

A9: *Porque tudo ali tá na mesma velocidade e... Não importa...*

Confusão de vozes

P: *Ou ainda, [...] eu to andando nessa direção e nesse sentido com uma velocidade de 99% da velocidade da luz, se eu olhar pra mim, eu vou estar mais fino?*

A8, A9: *Não*

P: *Por que não?*

Confusão de vozes

A2: *Uma pessoa parada vai te ver mais fino dependendo da velocidade agora...*

P: *Agora, eu não!*

Confusão de vozes

A10: *Então não é só uma ilusão de ótica? Se quem te mede...*

P: *Não, é que o comprimento é relativo. O comprimento depende de quem tá medindo, depende do referencial. Lembra que a gente viu que a velocidade dependia do referencial, algumas coisas dependiam do referencial? O tempo*

depende do referencial e o comprimento também depende do referencial. A diferença do Einstein é essa.

A8: Viu professor? Não tem importância não. Se o cara tá na velocidade da luz e se medir, vai ser a mesma ... mesmo comprimento que se ele estiver parado. Não é isso?

P: Sim.

A10: O que eu imagino é assim ó, eu me imagino andando em uma nave em pé, na velocidade da luz, por exemplo, e um carinha vem e conseguir me medir, ah o A10 tá com 15 centímetros de tamanho por exemplo.[...] Como isso? [...] Isso é real? O que não é uma ilusão de ótica é uma coisa real. [...] O que não é uma ilusão de ótica é uma coisa real, mas como que ela pode ser real, se o cara tá te vendo...

Confusão de vozes

P: Cara, o que é real? Você já viu Matrix?

Confusão de vozes

A10: É legal o filme.

P: Não tinha um trecho que o cara falava o que é real?

Confusão de vozes

P: Real é o que você vê?

A15: Você não é real professor, vou te deletar.

P: Um das coisas que a Física Moderna mexe é com o nosso conceito de realidade. O que a gente acha que é real.

Confusão de vozes

A10: Talvez a nossa cabeça não consiga processar essa informação. É por isso que essa física... [...] A minha cabeça não é capaz de processar essa informação.

A14: só estudando uns oito anos...

A questão levantada por A10 proporciona uma importante discussão. Ele associa a contração do corpo em movimento a forças de compressão, de maneira semelhante à interpretação de contração dada por Lorentz-Fitzgerald. O professor, neste momento, perde a oportunidade de mencionar essa outra visão, reinterpretando o resultado da experiência de Michelson-Morley à luz da teoria de Lorentz, por exemplo, ampliando a visão dos estudantes sobre o desenvolvimento da ciência a partir da menção à competição de programas de pesquisa. Entretanto, reforçando os postulados de Einstein, a discussão retorna para o princípio da relatividade e os estudantes são questionados se seriam capazes de perceber os efeitos relativísticos no interior da nave. A14 aponta que sim e relaciona com a alta velocidade da nave. A maioria das manifestações indica uma assimilação do primeiro postulado da relatividade. A4 esclarece que, para ele, o tempo

não está apenas associado ao relógio, mas também a outros processos, os quais também estariam atrasando em função da alta velocidade, de modo que o observador no interior da nave não teria condição de perceber alterações. A2 e A8 afirmam que este efeito só poderia ser percebido por outro observador em movimento, em relação ao localizado na nave. A10 associa essa contração a um efeito aparente, a uma *ilusão de ótica*, e reluta em aceitar a relatividade do comprimento. Esse resultado parece indicar que a contração do comprimento possa ser ainda mais contra-intuitiva do que a dilatação temporal, uma vez que está associada a percepções sensoriais (visão e tato). O aluno que havia manifestado uma noção prévia sobre a relatividade do tempo tem dificuldade de estender a mesma relação de dependência do referencial para o comprimento. Na visão de A10, a relatividade do tempo propicia-lhe adquirir os conceitos científicos sem negar suas próprias concepções. No entanto, em relação à definição de comprimento, não admite uma diminuição no *status* de sua concepção empirista em favor do racionalista ampliado com o aprendizado. A fim de afastar a perturbação, o debate recai em uma discussão sobre concepção de realidade e o professor não foi hábil em identificar as diversas conceituações de realidade dos alunos. A15 manifesta que real, ao seu ver, é tudo aquilo que não é virtual e que não pode ser *deletado*. Apesar de não ter incentivado a discussão, o professor comenta que a Física Moderna tem evidenciado que, muitas vezes, a interpretação dos fenômenos da natureza transcende nosso senso de realidade.

Ao final do último encontro, recordamos o problema da detecção de múons na superfície terrestre para interpretá-lo utilizando a contração das distâncias. No episódio final de nossa análise, transcrevemos este momento.

Episódio 21 – No referencial do múon – Fragmento do 11º Encontro
CD2 Legenda: P – o autor e professor
 An – alunos

P: O tempo que passa pro múon, pra nós passa um tempo 22 vezes maior. Então, nós que estamos aqui na Terra, olhando o múon chegar a gente diz o seguinte: olhe, ele chega. Por quê? Porque quando passa dois

microssegundos pra ele, pra nós já passou muito mais tempo, por isso que ele consegue vencer essa distância. Agora, pro múon gente, ele agora, imaginem que vocês são o múon, tá? [...] Vocês são o múon, vocês estão olhando no relógio de vocês e passa dois microssegundos, pra vocês múons, por que vocês conseguem chegar na superfície da Terra?

A9: Por que a Terra tá se aproximando nessa mesma velocidade.

A6: Porque a distância é menor?

[...]

P: Gente, são duas interpretações da mesma coisa, ó... Nós que estamos aqui na Terra olhando o múon, a gente conclui o que? Por que ele chega? Porque o tempo passa mais devagar pra ele do que pra nós. [...] Só que o múon, ele tá olhando no relógio. Por que ele chega?

A9 e A10: Porque há uma contração da distância.

A reinterpretção do resultado da experiência aborda a relação de interdependência entre os conceitos de tempo e espaço, prevista pela relatividade restrita, destacando a simetria entre a dilatação temporal e a contração do comprimento. A9, aplicando o conceito de relatividade do movimento, aparenta ter dificuldade de perceber que, se a distância não for alterada, a detecção não poderia ser explicada pelo referencial do múon. Entretanto, A6 associa à contração do espaço a detecção da partícula e, posteriormente, A9 e A10 também manifestam concordância com essa visão. Vislumbramos, novamente, a apropriação da significação dada por um aluno pelos seus pares, aproximando-se de um entendimento em comum.

4.4 Interpretação dos Efeitos Relativísticos e Metacognição

Para verificar a assimilação dos conceitos discutidos em sala, sua aplicação em situações-problema, e a tomada de consciência do processo por parte dos estudantes, elaboramos um questionário final. Este, denominado pós-teste (Anexo 13), continha quatro questões que visavam detectar a compreensão das conseqüências da relatividade e a aplicação da dilatação temporal na explicação de situações-problema. A quarta questão perguntava sobre a capacidade de perceber os efeitos previstos pela relatividade em nosso dia-a-dia e se os estudantes acreditavam que os mesmos realmente existem. Nove estudantes mencionam que não percebemos esses efeitos, seja em virtude das

baixas velocidades cotidianas, como no caso de A10 (*Em nosso dia-a-dia trabalhamos com velocidades baixíssimas em comparação à velocidade da luz e por isso não percebemos essa dilatação que só ocorre (são percebidas) (sic) com velocidades altíssimas*) ou pela dificuldade de serem medidos, segundo A3 (*Não porque estes efeitos acontecem muito rápido em nanossegundos*). Porém, dois deles mencionaram que percebem a relatividade do tempo associando-a à noção subjetiva de tempo, categoria denominada de Tempo Psicológico, vide A17: *Sim, porque quando a pessoa gosta de fazer alguma coisa legal ou assistir seu programa favorito o tempo passa voando, mas quando a gente faz alguma coisa que não gosta o tempo custa a passar*. Outros quatro associaram a contração do comprimento à diminuição do tamanho da imagem projetada em nossa retina, quando nos afastamos de um objeto, conforme relato de A6: *Sim, quando estamos viajando, e olhamos para uma árvore bem alta. Nós podemos perceber que ela está menor*. Quanto à opinião pessoal em relação à existência ou não dos efeitos, treze estudantes (65%) disseram que acreditam na existência dos mesmos, sendo que cinco mencionam comprovações experimentais, como A18: *É claro, as experiências feitas provam que tudo isso existe mas a maioria de nós não percebemos, pois é muito rápida*; quatro acreditam por razões pessoais, A9: *Sim, porque aceito que o tempo dilata com a velocidade e também a contração do comprimento*; e três demonstram acreditar devido à autoridade do professor e/ou o poder da ciência, como A14: *Eu costumo acreditar no que vejo... e sabendo que nunca vou conseguir vê-los eu creio nessa teoria e confio em tudo que escutei e acreditei que o que você disse seja pelo menos 5% de verdade*. A17 pensa que eles existam, pois já percebeu que o tempo passa mais rápido ou mais devagar dependendo da situação. Dos sete estudantes que disseram não acreditar na existência dos efeitos, A4 diz que *é difícil de acreditar*, A1

comenta que *não temos comprovações claras* e A7 menciona que entendeu tudo, mas não acredita que o tempo possa passar de maneira diferente.

A questão cinco do referido teste é idêntica à sexta do pré-teste e apresenta a situação do paradoxo dos gêmeos pedindo que os estudantes opinem sobre a justificativa do irmão mais novo. Quinze estudantes (75%) associaram corretamente a diferença de idade dos dois irmãos gêmeos com o fato de que, em altas velocidades, o tempo passa mais devagar, mostrando relativa aceitação da dilatação temporal; três mencionaram que o tempo passa mais devagar fora da Terra.

A situação problema apresentada na sexta questão pretendia verificar a aplicação da dilatação temporal. Dez alunos assinalaram a alternativa que consideramos correta e justificaram sua escolha relacionando a diminuição do ritmo do tempo com a velocidade. Na questão sete, um exercício numérico foi proposto e, com o auxílio da calculadora, doze estudantes apresentaram a resposta correta.

Na oitava questão, visamos retomar o conceito de tempo e perceber a evolução conceitual em relação às concepções levantadas no pré-teste. No primeiro item, buscamos identificar novamente a separação do tempo de sua medida, e constatamos que A5, A14 e A17 mantiveram forte influência da noção empirista de tempo, não o separando de sua medida. A3, que não havia manifestado essa noção no pré-teste, fez isso no pós. Porém, para A1, A8, A15, A16 e A20, as atividades parecem ter proporcionado uma evolução conceitual em virtude de não terem manifestado a categoria de Tempo Cronológico a qual havia sido constatada no pré-teste. No segundo item, foi apresentada uma afirmação contendo a noção de tempo absoluto com o intuito de verificar se os estudantes a negariam elucidando a noção relativística. Nove estudantes negaram que o tempo passe da mesma forma para todos, referindo-se à concepção de tempo relativístico e associando-o com a velocidade, como na resposta de

A12: *Dependendo em qual situação, se você estiver viajando em alta velocidade pra você o tempo passa mais devagar.* Especificamente para o caso deste aluno, considerando sua concepção prévia de tempo detectada no pré-teste, a correta menção à noção relativística evidencia a proficiência da intervenção na ampliação das zonas de seu perfil conceitual. Oito estudantes também negaram que o tempo seja absoluto, mas justificaram suas respostas ou mencionando a noção de tempo subjetivo, como A2, A8, A3, A17 e A13, ou caracterizando como causa outros fatores, como finitude da velocidade da luz (A15), atraso em relógios (A5) ou diferenças de latitude (A20). O fato de que A2 e A8, alunos que se destacaram durante a intervenção devido à intensa participação e à assimilação das discussões, bem como à correta aplicação da dilatação temporal nas outras questões do pós-teste, manifestaram o tempo psicológico neste item reforça a pertinência da escolha do referencial teórico que prevê a coexistência dos diversos aspectos de um conceito científico na estrutura cognitiva do indivíduo e a aplicação de cada um deles nos contextos apropriados. A18 e A16 concordam com a afirmação proposta neste item, confirmando o caráter absoluto de tempo, o que, pelo mesmo motivo mencionado para o caso de A2 e A8, não significa que os mesmos não tenham incorporado a noção relativística.

O quadro esquemático a seguir compara as concepções de tempo dos estudantes antes e depois da intervenção. Percebemos que apenas cinco alunos não elucidaram a concepção relativística de tempo no pós-teste e, mesmo para os que haviam manifestado TR no pré-teste, as atividades contribuíram para esclarecer sua relação com a velocidade e aumentar seu *status* nas interpretações de fenômenos.

Quadro 6. Comparação entre concepções espontâneas levantadas no pré-teste com as obtidas no pós-teste. A primeira linha representa as categorias conforme catalogadas anteriormente, e a primeira coluna, os alunos participantes, discriminados por A1, A2, ... A20. O preenchimento cheio representa a categoria apontada somente no pré-teste, o X indica a detectada somente no pós e a hachura vertical indica que as categorias foram identificadas em ambos os questionários.

	TP	TC	TN	TQ	TD	TI	TS	TR
A1	■	■	X		■			X
A2	X		■					▨
A3			■		■			X
A4			■					X
A5		▨			■			X
A6			■					X
A7			■					X
A8	▨	■						X
A9			■					▨
A10			■					▨
A11		■						
A12	▨							X
A13	X		▨					
A14		▨		■	■			X
A15	■	▨			■			
A16		■	X					X
A17	X	▨				■		
A18	■		X					X
A19			■					X
A20		■						

Visando averiguar a metacognição, entendida como a tomada de consciência, pelos estudantes, do processo de transformação de seu próprio perfil, o terceiro item da oitava questão do pós-teste questionava-os sobre a eventual mudança na forma como eles entendiam o tempo. As frases abaixo, transcritas das respostas a este item, nos permitem avaliar essa consciência e a relevância das atividades realizadas.

A1: *Mudou muito e para melhor. Porque antes eu dava mais importância para o relógio do que para o tempo. Eu achava que o tempo era igual para todos e hoje vejo que não.*

A3: *Sim, porque eu aprendi que o tempo é muito importante, eu achava que o tempo era constante e aprendi que ele pode variar em um tempo imperceptível.*

A5: *Sim, pois antes de assistir às aulas eu pensava que o tempo era um relógio insignificante e agora vejo que o tempo é científico e relativo.*

A6: *Sim, pois, na verdade, nunca tinha parado para pensar especificamente sobre o “tempo” em todas as suas indagações. As aulas contribuíram para mudar algumas*

noções que eu pensava ter sobre o que é o tempo ou como ele é. Esse projeto me fez refletir muito sobre isso e, inclusive, nas nossas primeiras aulas, me fez viajar nisso tudo e refletir sobre ele.

A7: Sim. Antes era assim: “Sei o que é tempo, até me perguntarem.” Antes não tinha palavras para explicar o tempo, hoje ainda não tenho, mas antes meu pensamento sobre o tempo era simples: Tempo é tempo, um segundo é um segundo. Hoje, já não tenho certeza se o tempo é absoluto, também não sei explicar o tempo, é uma polêmica! Será? O tempo passa mais rápido para um que para outros?

A9: Sim, porque tinha a idéia de tempo como invariável e a minha idéia mudou.

A14: O meu conceito por tempo mudou totalmente. Antes eu pensava que o tempo era sempre a mesma coisa, dentro do meu mundinho, agora, depois de ter estudado-o tanto, vejo como ele é cheio de coisinhas. Vi que o tempo não é só as 24 hs que “era” para mim antes para todo mundo. Ele é totalmente relativo, o tempo que é pra mim aqui, não é o mesmo, nem contado do mesmo jeito para quem está no espaço por exemplo.

A15: Passei a entender sobre os assuntos. Antes achava que o tempo era algo pessoal, cada um usa seu tempo como queria, agora entendo que tempo é relativo, como o exemplo da estrela.

As opiniões dos estudantes nos mostram a consciência dos mesmos em relação à ampliação de seus perfis conceituais de tempo. A1, A5 e A14 revelam que, antes da intervenção, suas idéias sobre tempo estavam muito relacionadas com o relógio, caracterizando a categoria de Tempo Cronológico (empirismo segundo Martins (2004)), e que, após as reflexões, eles admitem que o tempo possa depender de um referencial, característica fundamental da categoria de Tempo Relativo. A3, A7 e A9, que acreditavam em uma noção absoluta de tempo, agora já admitem que o mesmo possa ser relativo. A6 revela que não havia pensado tanto sobre o tempo e não percebia as suas diversas interpretações; ele aponta que as discussões feitas em sala foram responsáveis por uma mudança em sua concepção. A7 externaliza o conflito entre a noção absoluta e relativística, gerado pelas aulas. A15 demonstra uma evolução ainda mais significativa por mencionar que sua idéia inicial de tempo subjetivo foi ampliada pelas discussões.

No último capítulo desta dissertação, apresentamos os principais resultados de uma forma resumida, discutimos sobre a pertinência das atividades desenvolvidas para o ensino da teoria da relatividade em nível médio, finalizando com nossas conclusões gerais sobre o estudo e as perspectivas para a continuidade da pesquisa nesta área.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Transformar as escolas que cultuam práticas tradicionais, aquelas que educam crianças e jovens para a reprodução do modelo social vigente, e criar condições de acesso, por parte dos alunos, aos pilares do desenvolvimento científico e cultural contemporâneos têm representado uma constante preocupação de diversas pesquisas na área de ensino, pois esse tipo de iniciativa *requer esforço do coletivo de profissionais da educação, de alunos, de pais e governantes* (PIMENTA, 1999, p. 7).

Como forma de contribuir para a inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, em nossa pesquisa, analisamos a pertinência de algumas estratégias didáticas para a discussão de tópicos da Teoria da Relatividade Restrita a partir de conceitos da Mecânica e avaliamos a ampliação da noção de tempo dos estudantes proporcionada pela mesma. Baseando-nos no pilar *Sprinkle*, proposto por Resnick (1987), segundo o qual as teorias modernas devem ser gradativamente incorporadas aos conteúdos clássicos, buscamos identificar, dentre os conteúdos normalmente trabalhados no primeiro ano do Ensino Médio, temas geradores adequados para a abordagem de conceitos da teoria de relatividade restrita. Selecionamos especificamente o conceito de referencial e de tempo, uma vez que uma das possíveis contribuições do ensino da teoria da relatividade, analisada mais cuidadosamente por nós, é justamente a ampliação do perfil conceitual de tempo propiciada pelo reconhecimento de sua relação com a velocidade e dependência do referencial, características do tempo relativístico. Essa escolha permitiu constatar tanto a construção do conhecimento intuitivo (no caso do nosso estudo pela elucidação das categorias TP, TC, TI, TD e TQ), quanto do contra-intuitivo (TS, TN e TR), num mesmo processo.

Com relação à referida ampliação das zonas do perfil conceitual de tempo, a análise de dados dessa investigação mostrou uma evolução conceitual significativa em

relação aos posicionamentos iniciais dos sujeitos, conforme apontado nos capítulos 3 e 4, permitindo a identificação de vários elementos que apresentam consonância com a literatura e legitimando a opção pelo referencial teórico, os quais destacamos:

- a) o papel fundamental dos conflitos, como condição necessária para o desencadeamento dos processos de assimilação e acomodação (PIAGET, 1976; POSNER *et al.*, 1982, entre outros);

Situações contra-intuitivas, como a experiência de Hafele-Keating e o problema da detecção dos múons na superfície da Terra, foram apresentadas durante as aulas justamente com o objetivo de promover um conflito com as estruturas cognitivas dos alunos.

- b) a importância dos desequilíbrios de caráter lacunar para a percepção da necessidade de se buscar novos conhecimentos (PIAGET, 1976; CARVALHO *et al.* 1992);

Após uma abordagem qualitativa da dilatação temporal, questões de ordem quantitativa promoveram uma perturbação lacunar à medida que os estudantes perceberam que precisariam estruturar matematicamente a relação entre velocidade e tempo.

- c) a relevância da insatisfação em relação às suas concepções prévias (POSNER *et al.*, 1982; HEWSON e THORLEY, 1989);

Apesar de não ser uma regra geral, muitos estudantes demonstraram insatisfação em relação às suas concepções prévias, como no caso de A8 do estudo piloto: *Antes eu tinha um conceito de tempo muito diferente. **Eu não tinha muita noção, mas com as atividades [...] ou de A1 do estudo final: Mudou muito e para melhor. Porque antes eu dava mais importância para o relógio do que para o tempo.***

d) o papel crucial da plausibilidade da nova teoria (POSNER *et al.*, 1982);

As questões mais contra-intuitivas da teoria, como o segundo postulado e a dilatação temporal, foram justificados tanto por argumentos teóricos como por meio da apresentação de evidências experimentais visando torná-las plausíveis aos estudantes.

e) a importância da interação social e afetiva com os pares, evidenciada nos diversos debates entre os alunos, descritos no capítulo 4 (STRIKE e POSNER, 1992; MORTIMER, 1994; GARRIDO, 1996; BOLZAN, 2002);

Em vários momentos o professor somente observava os debates dos alunos. Isso ficou particularmente evidente em momentos dos Episódios 5 e 17 (p. 125 e p. 156) por exemplo.

f) o papel fundamental da metacognição, constatada nas respostas dos estudantes e em algumas de suas colocações transcritas nos episódios de ensino, evidenciando que os mesmos demonstram consciência de seus perfis conceituais e do processo (DRIVER, 1988; HEWSON e THORLEY, 1989; GARRIDO, 1996; MORTIMER, 1994);

Claramente manifestada nas frases dos estudantes, como A1 do estudo piloto: *[...] antes não fazia a mínima idéia que o tempo não é um coisa fixa e sim relativa* ou A7 do estudo final: *Antes não tinha palavras para explicar o tempo, hoje ainda não tenho, mas antes meu pensamento sobre o tempo era simples: Tempo é tempo, um segundo é um segundo. Hoje já não tenho certeza se o tempo é absoluto [...].*

Segundo Mortimer (1994), a construção do conhecimento intuitivo pode ser descrita com base no referencial piagetiano da equilibração, tendo o professor o papel de planejamento e monitoramento do processo, intervindo quando necessário com questões cruciais e dados empíricos (GARRIDO, 1996). Por outro lado, Mortimer (1994) aponta, também, que a construção do conhecimento contra-intuitivo em sala de

aula, segundo estratégias do Modelo de Mudança Conceitual de Posner e colaboradores (1982), é limitada pela necessidade de insatisfação com as idéias prévias e de superação das mesmas. Nesse sentido, as dificuldades em se reconhecer o conflito, uma vez que os educandos precisariam dominar aspectos da nova teoria para que pudessem identificar anomalias e contra-exemplos, levaram a um modelo que retarda o conflito para o final da instrução, após a construção da nova teoria, quando a mesma é então comparada com as idéias prévias (ROWEL, 1989). Mortimer (1994), ao propor seu modelo de evolução de perfis conceituais, preconiza a identificação e superação de obstáculos ontológicos e epistemológicos. Segundo Ferreira (1999), *essa visão holística do aluno está em seus primeiros passos rumo a uma comprovação, ou não, de seus pressupostos* (FERREIRA, 1999, p. 79), apontando a transcendência às críticas a outros modelos e o estabelecimento claro de seu programa como contingências desse referencial teórico. Nosso trabalho almejou estabelecer elementos para esse programa através da concepção e implementação dos momentos pedagógicos propostos por Delizoicov e Angotti (1991).

Essa opção mostrou-se eficaz para os objetivos de nossa pesquisa. Baseando-nos na idéia de que as concepções dos estudantes desempenham um papel fundamental para o processo educacional, procuramos elucidá-las a partir da aplicação de um questionário inicial. Analisando alguns dos obstáculos epistemológicos e ontológicos para a assimilação da relatividade, o primeiro momento pedagógico (problematização inicial) foi oportunizado iniciando pela discussão de fundamentos da relatividade galileana. Partindo da apresentação de situações hipotéticas, os posicionamentos manifestados pelos estudantes confirmaram os resultados do pré-teste, indicando a crença em um movimento absoluto. Uma experiência foi realizada com o objetivo de instaurar o conflito sócio-cognitivo. As colocações dos alunos frente à perturbação conflitiva

confirmaram a fase alfa da teoria da reequilíbrio de Piaget; os debates conduzidos em sala bem como os direcionamentos intencionais do professor evidenciaram a importância da interação social para a construção do conceito científico, fundamental para a teoria de Vygotsky.

O tratamento dado ao conceito de tempo na cinemática clássica reforça seu caráter absoluto, o que também foi caracterizado como um obstáculo para a noção relativística. As diferentes noções de tempo estão dispostas hierarquicamente, como aponta Martins (2004) em sua proposição de perfis epistemológicos para esse conceito. Assim, descrevemos momentos dos três primeiros episódios de ensino no Capítulo 4, nos quais conduzimos discussões históricas e filosóficas sobre o tempo, nas quais os estudantes puderam externar e debater suas concepções acerca deste conceito. O objetivo dessas atividades planejadas e implementadas sob o referencial da enculturação (MORTIMER, 1994) residia em aprofundar a diversidade, os conflitos e a criatividade. Nestes, o professor atuou como mediador da discussão, levantando as questões mais relevantes ou interpondo outras de natureza lógica, sem fornecer respostas para as mesmas. Isso possibilitou que os estudantes percebessem as diversas faces e interpretações deste conceito, através dos posicionamentos de seus próprios colegas, reforçando a importância da interação entre os pares para o processo educacional.

Em função do resultado do pré-teste, no estudo final, planejamos um encontro para discutir a questão da finitude da velocidade da luz, no qual a importância dessa interação ficou ainda mais clara, ao observarmos os estudantes que já haviam entendido a situação procurando explicá-la para seus próprios colegas, em consonância com o resultado obtido por Mortimer de que *o entendimento que os mais avançados têm da tarefa predomina e o desempenho dos mais atrasados tem o suporte deles* (MORTIMER, 1994, p. 255).

Partindo da idéia de que a interação social é mais adequada para a aprendizagem de conhecimentos contra-intuitivos e disposto a oportunizar o contato do indivíduo com a cultura científica, o professor implementou a organização do conhecimento (segundo momento pedagógico). Assim, os postulados da relatividade restrita foram legitimados, tanto através de argumentos teóricos, como pela menção dos resultados experimentais. Os estudantes manifestaram resistência à aceitação dos postulados, elucidando suas concepções clássicas e evidenciando o processo de conflito, em concordância com o apontado por Arruda (1994), enquanto o professor buscava argumentos que concorressem para a plausibilidade da teoria. Nesse sentido, a menção à experiência de Michelson-Morley se mostrou pedagogicamente interessante, pois, além de possibilitar uma discussão epistemológica sobre a visão empirista de ciência, seus resultados configuraram como uma comprovação do segundo postulado. Em se tratando das possíveis maneiras de apresentar tal experiência, percebemos a possibilidade de partir de uma analogia com a cinemática, envolvendo problema de travessias de barcos ou nadadores, constantes na discussão sobre composição de movimentos (PEDUZZI, 1998), além da analogia com o som, evidenciando que a velocidade de uma onda não dependeria do movimento da fonte. No estudo final, optamos por não abordar o tratamento matemático da experiência, e percebemos que sua compreensão foi prejudicada.

Acreditamos que a assimilação só pode ser constatada à medida que os alunos sejam capazes de aplicar os conceitos em situações diversas, particularmente às situações perturbadoras utilizadas no início do processo. Essa fase, conhecida como comportamento gama da teoria piagetiana, foi oportunizada no terceiro momento pedagógico de nossa proposta. Aplicando o segundo postulado em uma experiência de pensamento, a dilatação temporal foi apresentada como consequência do mesmo e a

dedução matemática de sua expressão permitiu relacioná-la com a velocidade do móvel. Os estudantes resistiram a aceitar a relatividade do tempo, justificando seus argumentos a partir da noção de tempo absoluto, resultado esse em sintonia com o levantado por Scherr *et all* (2001). A abordagem quantitativa se mostrou fundamental para a compreensão dessa relação e da magnitude da dilatação do tempo. A solicitação de um aluno para calcular o atraso devido à velocidade da sonda Helios (conforme descrito no Episódio 18, Capítulo 4, p. 157) reforçou essa relevância à medida que os estudantes perceberam que a estimativa feita pelo mesmo foi muito distante do resultado obtido pela aplicação dos valores na fórmula.

A necessidade de um tratamento numérico emergiu em diversos momentos de nossas aulas. Muitos criticam a presença exaustiva da Matemática no ensino de Física e defendem que o este ensino esteja mais voltado às questões de ordem conceitual. Anuímos em parte a esta crítica, porém, defendemos o uso propedêutico da matemática devido a sua importância como linguagem estruturante da Física. Se objetivamos ampliar significativamente a capacidade de abstração do educando, sua presença é fundamental.

Verificamos uma progressiva evolução na qualidade da argumentação dos educandos ao longo do processo, indicando a tomada de consciência de seu próprio perfil e em relação à ampliação do mesmo. As respostas às questões de natureza metacognitiva, constantes nos questionários finais, indicam essa consciência, confirmando a pertinência das estratégias utilizadas em nossa proposta. Revelam, ainda, uma gradativa apropriação intrapsicológica, oferecendo uma outra perspectiva, a do sujeito, quanto ao processo vivenciado.

A interpretação dos resultados obtidos, seja no que se refere à ampliação do perfil conceitual, seja em relação ao próprio desenvolvimento do processo, permite

constatar a instalação e, até certo ponto, a superação de conflitos. O uso dos referenciais teóricos adequados oportunizou a previsão de uma série de situações problemáticas que se concretizariam em sala de aula. Por outro lado, é inerente ao conceito de zona de desenvolvimento proximal haver uma diferença entre o desenvolvimento atual de uma pessoa, que se traduz no seu desempenho individual, e o desenvolvimento proximal, o seu desempenho nas mesmas tarefas com o suporte de outrem. Nossos procedimentos não indicam qual suporte seria necessário fornecer para que os alunos que não atingiram as concepções relativísticas o fizessem.

Certamente, um trabalho que se encerra abre possibilidades para o desenvolvimento de outros. Nesse sentido, é fundamental que apontemos as perspectivas para a continuidade desta pesquisa.

A maioria das tentativas de inserção da Relatividade em nível médio, presentes na literatura, deu-se através da aplicação de módulos didáticos desconexos do conteúdo habitualmente abordado, quando não excluídos do próprio contexto de sala de aula em atividades extracurriculares. Essa prática destoa da proposta de *sprinkle* e se contrapõe à incorporação da relatividade ao conteúdo trabalhado no Ensino Médio. Obviamente, alguns conteúdos precisariam ser postergados (*overview*), o excesso de aplicação de exercícios padrão repensado, bem como novos materiais didáticos teriam que ser produzidos para atender a essa demanda.

Identificamos algumas *portas de entrada* para a abordagem de conceitos da relatividade partindo da Cinemática. Porém, vislumbramos a possibilidade de outras inserções ao longo do tratamento da Mecânica. A questão da variação da massa em função da velocidade seria inserida ulterior às leis de Newton, pois corrobora para o caráter ontológico da concepção da massa enquanto resistência à mudança do estado de movimento. De uma maneira semelhante à estratégia que utilizamos, uma discussão

sobre as evidências experimentais que comprovam a velocidade da luz como limite poderia ser conduzida. A interpretação do movimento orbital planetário como generalização da primeira lei de Newton para o espaço curvo, devida a Einstein, também caberia nesse momento.

A relação massa-energia poderia ser abordada como uma generalização do princípio de conservação de energia, unificando conceitos e interpretando o significado da equação $E = mc^2$, bem como sua relação com a radioatividade e a Física Nuclear. Um debate sobre a relação entre esta equação e o desenvolvimento da bomba atômica, enfocando as relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade, oportunizaria, ainda, uma abordagem interdisciplinar do uso do conhecimento científico no contexto político e social, bem como o questionamento da neutralidade científica, em consonância com o apontado por Terrazzan ao afirmar que *a dupla ruptura (epistemológica) proposta desconstrói a ciência, inserindo-a numa totalidade que a transcende, seguindo alguns processos recorrentes* (TERRAZZAN, 1994, p. 152). Alguns fundamentos da relatividade geral também podem ser tratados ainda no primeiro ano. O princípio de equivalência pode ser trabalhado após a abordagem de forças fictícias em sistemas não inerciais, problemas normalmente constantes após o ensino da segunda lei de Newton. Durante o ensino da lei da gravitação universal de Newton, vislumbramos também a possibilidade de mencionar a interpretação einsteiniana de curvatura do espaço.

Antecipamos a busca por inserções de temas relativísticos pulverizados entre os conteúdos clássicos nos outros dois anos do Ensino Médio, como preconizado por Rodrigues (2001). O ensino do efeito Doppler relativístico após o estudo de ondas sonoras e o ensino do campo eletromagnético como efeito do movimento das cargas são exemplos das possibilidades. É preciso investigar cuidadosamente as melhores estratégias que permitam transpor didaticamente estes conteúdos, através do

acompanhamento da assimilação dos mesmos pelos estudantes em pesquisas futuras.

Segundo Terrazzan (1994), entre outros, não há chance de sucesso no empreendimento de inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, sem o estabelecimento de parcerias colaborativas com o professor deste nível. Isto implica em atualizar sua formação tanto na questão do conteúdo e das metodologias alternativas, quanto na discussão de posturas epistemológicas, apontando para a recuperação de concepções de interdisciplinaridade, da educação multifocada e pluridimensionada (Fazenda, 1997), de modo que se analise a efetivação da diversidade de metodologias em ensino de Ciências, que infelizmente parece, hoje, ocupar um lugar marginal nas discussões sobre o tema.

Inúmeros são os trabalhos constantes na literatura específica sobre a inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, mas sua presença é raramente detectada nas salas de aula. As dificuldades são muitas: professores sem formação específica, ensino voltado para o vestibular, alto grau de complexidade das teorias, falta de materiais didáticos específicos, entre outras. Esse trabalho procurou mostrar que podemos tratar de conceitos da relatividade desde o início do primeiro ano e que essa abordagem é extremamente benéfica em função dos resultados obtidos. Assim, é de nossa responsabilidade a resolução das dificuldades mencionadas visando o ensino de uma Física, clássica e moderna, mais interessante, envolvente e desafiadora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR JR, O Papel do Construtivismo na Pesquisa em Ensino de Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências* v. **3**, n. 2, IFURGS, Porto Alegre, 1998. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol3/n2/v3_n2_a2.htm> Acesso em 2 de março de 2005.
- AGUIAR JR, MORTIMER, E. F. Tomada de Consciência de Conflitos: Análise da Atividade Discursiva em uma Aula de Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências* v. **10**, n. 2, IFURGS, Porto Alegre, 2005. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol10/n2/v10_n2_a3.htm> Acesso em 10 de julho de 2005.
- ANDREWES, W. Uma crônica do registro de tempo. *Scientific American Brasil*, ano **1**, n. 5, p. 88–97, 2002.
- ANGOTTI, J. A., CALDAS, L. I., DELIZOICOV, D. N., RÜDINGER, E. e PERNAMBUCO M. M. C. A. Teaching relativity with a different philosophy. *American Journal of Physics*, v. **46**, n. 12, p. 1258-1262, 1978.
- ARONS, A. B. *A Guide to Introductory Physics Teaching*. New York: John Wiley, 1990.
- _____. *Teaching Introductory Physics*. New York: John Wiley, 1997.
- ARRUDA, S. M. *Mudança Conceitual na Teoria da Relatividade Especial*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 1994.
- BACHELARD, G. *O Novo Espírito Científico*. Rio de Janeiro, Tempo Brasileiro, 1985.
- _____. *Materialismo Racional*. Trad. Arthur Lopes Cardoso. Lisboa: Edições 70, 1990.
- _____. *A formação do Espírito Científico*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. Tradução por Estela dos Santos Abreu.
- BARDIN, L. *Análise de Conteúdo* São Paulo, SP: Edições 70, 1999.
- BOLZAN, D. *Formação de Professores – compartilhando e reconstruindo conhecimentos*. Porto Alegre: Mediação, 2002.
- BRASIL, Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica, Brasília, *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*, 1999.
- BRASIL, PCNEM + Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias Secretaria de Educação Média e Tecnológica – Brasília: MEC; SEMTEC, 2002. 144 p. Disponível em: <<http://www.mec.gov.br/semtec/ensmed/ftp/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em 09 de agosto de 2003.

- BOEHA, B. B. Aristotle, alive and well in Papua New Guinea science classrooms. *Physics Education* v. **25**, n. 5, p. 280-283, 1990.
- BORGHI, L., DE AMBROSIS, A. e GHISOLFI, E. Teaching Special Relativity in High School. *Proceedings of the III Seminar Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Ithaca, NY, 1993.
- BUNGE, M. *Seudociencia e ideologia*. Madrid: Alianza Editorial, 1985.
- CARNEIRO, S. Einstein e a cosmologia *Ciência & Ambiente/ Universidade Federal de Santa Maria – ed. Especial Albert Einstein*, v. **30**, p. 101 – 109, 2005.
- CARVALHO, A. M. P.; CASTRO, R. S.; MORTIMER, E. F. e LABURU, C. E. Pressupostos Epistemológicos para a Pesquisa em Ensino de Ciências. *Cadernos de Pesquisa* v. **82**, p. 85-89, 1992.
- CARVALHO, A. M. P. e GONÇALVES, M. E. R. Formação continuada de professores: o vídeo como tecnologia facilitadora da reflexão São Paulo. *Cadernos de Pesquisa*, 111, p.71-94, dezembro, 2000.
- CAVALCANTE, M. A. O Ensino de uma Nova Física e o Exercício da Cidadania, *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. **21**, n. 4, p. 550-551, 1999.
- CHAVES, A. S. *Física: Ondas, Relatividade e Física Quântica*, v. **3**. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, 2001.
- DALY, L. N.; HORTON, G. K. The Universality of Time Dilatation and Space Contraction. *The Physics Teacher* v. **32**, n. 5, p. 306-308, 1994.
- DELIZOICOV, D., ANGOTTI, J. A. *Física*. São Paulo: Cortez, 1991.
- DELIZOICOV, D., ANGOTTI, J. A., PERNAMBUCO M. M. C. A. *Ensino de Ciências: fundamentos e métodos*. São Paulo: Cortez, 2002.
- EINSTEIN, A. *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Tradução de C.A. Pereira. Revisão Técnica de I.C. Moreira. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Zahar, 1938.
- FAZENDA, I. (org). *Didática e Interdisciplinaridade*. Campinas, SP: Papyrus, 1998 (Coleção Práxis).
- FERREIRA, F. C. *Reflexos Poéticos no Ensino de Física: Imagens do Campo Eletromagnético*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 1999.
- FREIRE, P. *Pedagogia da Autonomia – Saberes Necessários à Prática Educativa*. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

FIGUEIRAS C. A. L. A Espectroscopia e a Química: da Descoberta de Novos Elementos ao Limiar da Teoria Quântica. *Química Nova na Escola*, n. 3, p. 22-25, Maio 1996.

GARRIDO, E. Analisando a interação verbal professor-alunos segundo categorias baseadas no Modelo de Mudança Conceitual. Em: *Formação de Professores: um Desafio*, Goiânia, Editora da Universidade Católica de Goiás, 1996.

GASPAR, A. *Física*. Volume 1. São Paulo, Ática, 2000.

GOLDSMITH, M. *Albert Einstein e seu universo inflável*. Trad. Eduardo Brandão. São Paulo: Companhia da letras, 2002.

GOMES, F. F.; COIMBRA, D. e LINDINO, T. C. Ensino de Relatividade Restrita através da Análise das Pré-Concepções dos Alunos In: XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2005, Rio de Janeiro, RJ. *Livro de Resumos*, 2005.

GONÇALVES, F., A. e TOSCANO, C. *Física para o Ensino Médio - Série Parâmetros*. Volume único. São Paulo: Scipione, 2002.

HALL, D.E. Intuition, time dilatation, and the twin paradox. *The Physics Teacher* v. **16**, n. 4, p. 209-215, 1978.

HELLSTRAND, A. e OTT, A. The utilization of fiction when teaching the theory of relativity. *Physics Education* v. **30**, n. 5, p. 284-286, 1995.

HELM, H. e GILBERT, Thought Experiments and Physics Education – Part.1 *Physics Education* v. **20**, n. 3, p. 124-131, 1985.

HEWSON P. W. e THORLEY N. R., The conditions of Conceptual Change in the Classroom, *International Journal of Science Education*, v. **11** (special issue), p. 541-553, 1989

HEY, T. e WALTERS, P. *Einstein's Mirror*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

HOLTON, G. Einstein and the Crucial Experiment. *American Journal of Physics*, v. **37**, n. 10, p. 968-982, 1969.

KARAM, R. A. S., COIMBRA, D. e SOUZA CRUZ, S.M.S.C. Ampliando Conceito de Tempo através da inserção da Teoria da Relatividade Restrita no Ensino Médio. *Comunicação Oral, V ENPEC*, Bauru – SP, 2005.

KÖHNLEIN, J. F. K. e PEDUZZI, L. O. Q. Uma discussão sobre a natureza da ciência no Ensino Médio: um exemplo com a Teoria da Relatividade Restrita. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* v. **22**, n.1, p.36-70, 2005.

KUHN, T. *A Estrutura das Revoluções Científicas*, 6ª ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2001.

LAKATOS, I. *The methodology of scientific research programmes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

LIMA, L. O. *Piaget: Sugestões aos educadores*. Petrópolis, RJ: Editora Vozes, 1998.

LOMBARDI, O. Aristotelian Physics in the Context of Teaching Science: A Historical-Philosophical Approach. *Science and Education* v. **8**, n. 3, p. 217-239, 1999.

LOPES, A R C Bachelard: o Filósofo da Desilusão. *Caderno Catarinense do Ensino de Física* v. **13**, n. 3, p. 248-273, 1996.

LÜDKE, M. e ANDRÉ M.E.D.A. *Pesquisa em educação: abordagens qualitativas*. São Paulo: EPU, 1986.

MARTINS, A. F. P. *Concepções dos estudantes acerca do conceito de tempo: uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard*. Tese de doutorado. São Paulo, 2004.

MARTINS, A. F. P. e ZANETIC, J. O Tempo na mecânica: de coadjuvante a protagonista. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* v. **19**, n. 2, p.149-175, 2001.

MARTINS, R.A. A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen. *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. **20**, n. 4, p. 373-391, 1998.

_____. A Física no final do século XIX: modelos em crise. *Física Moderna: Mito e Ciência*. SBPC, 2001. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/fisica/fisica05.htm>> Acesso em 6 de junho de 2005.

_____. A dinâmica relativística antes de Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. **27**, n. 1, p. 11 - 26, 2005.

MÁXIMO, R. L. A. e ALVARENGA, A. B. *Curso de Física*. Vol. 1, São Paulo: Scipione, 2000.

MEDEIROS, A. Entrevista com Einstein. *Física na Escola*, v. **6**, n. 1, p. 88-94, 2005.

MOREIRA, I. C. e STUDART, N. Einstein e a divulgação científica. *Ciência & Ambiente/ Universidade Federal de Santa Maria – ed. Especial Albert Einstein*, v. **30**, p. 125 – 142, 2005.

MOREIRA, M. A. Ensino de Física no Brasil: Retrospectivas e Perspectivas, *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. **22**, n.1, p. 94-99, 2000.

MORTIMER, E. F. *Evolução do Atomismo em Sala de Aula: Mudança de Perfis Conceituais*. Tese de Doutorado, São Paulo, 1994.

_____. Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos?, *Investigações em Ensino de Ciências* v. **1**, n. 1, IFURGS, Porto Alegre,

1996. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/public/ensino/N1/2artigo.htm>. Acesso em 16 de fevereiro de 2005.

_____. Perfil Conceptual: Formas de Pensar y Hablar en Las Clases de Ciencias *Infancia y Aprendizaje* v. **24**, n. 4, p. 475-490, 2001.

MIZUKAMI, M. G. N. *Ensino: as abordagens do processo*. Temas Básicos de Educação e Ensino. São Paulo: E.P.U., 1986.

MULLER, R. Ether Wind and the Global Positioning System. *Physics Teacher*, v. **38**, n. 4, p. 243-246, 2000.

NEUGEBAUER, O. *The Exact Sciences in Antiquity*. New York: Dover Publications, 2a. ed., 1969.

NOGUEIRA, J. de S., RINALDI, C., FERREIRA, J. M e PAULO, S.R. de Utilização do Computador como Instrumento de Ensino - uma Perspectiva de Aprendizagem Significativa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. **22**, n. 4, p. 517-522, 2000.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica*, vol. **1**, 4ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

_____. *Curso de Física Básica*, v. **4**, 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

OLIVEIRA, I. S. *Física Moderna: para iniciados, interessados e aficionados*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

OSTERMANN, F. A Epistemologia de Kuhn. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. **13**, n. 3, p. 184-196, 1996.

_____. *Tópicos de Física Contemporânea em Escolas de Nível Médio e na Formação de Professores de Física*. Tese de Doutorado, Porto Alegre, 1999.

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo desta problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. **18**, n. 2, p. 135-151, 2001.

PAIS, A. “*Sutil é o Senhor...*”: *a ciência e a vida de Albert Einstein*. Trad. Fernando Parente e Viriato Esteves. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

PEDUZZI, L. Q. Q. *As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a História e a Filosofia da Ciência em um curso de Mecânica*. Tese de doutorado, Florianópolis, 1998.

_____. *Do átomo grego ao átomo de Bohr*. Produção interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

PIAGET, J. *A noção de tempo na criança*. Trad. Rubens Fiúza. São Paulo: Record Cultural, [original de 1946].

_____. *Equilíbrio das Estruturas Cognitivas*. Trad. Marion M.S. Penna. Rio de Janeiro, Zahar, 1976.

_____. *Biologia e Conhecimento*. 2ª Ed. Petrópolis: Vozes, 1996.

PIETROCOLA, M. e ZYLBERSZTAJN, A. The use of the Principle of Relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students. *International Journal of Science Education* v. **21**, p. 261 – 276, 1999.

POSNER, G. J., STRIKE, K.A., HEWSON, P.W. e GERTZOG, W.A. Accommodation of a Scientific Conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, v. **66**, n. 2, p. 211-227, 1982.

RAMALHO, F. J., FERRARO, N. G. e SOARES, P. A. T., *Os Fundamentos da Física*. São Paulo: Moderna, 1993.

REGO, T. C. *Vygotsky: uma perspectiva histórico-cultural da educação*. Petrópolis, RJ: Vozes, 1995.

RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. **27**, n. 1, p. 27-36, 2005.

RESNICK, R. Overcoming Constraints and Problems. *Proceedings of the Conference on the Teaching of Modern Physics held at the Fermi National Accelerator Laboratory*, American Association of Physics Teachers, 1987.

REZENDE JR, M. F. *Fenômenos e a introdução de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2001.

RODRIGUES, C. D. O. *Inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio: Uma nova proposta*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2001.

ROSSER, W. G. V. Recent changes in the teaching of special relativity. *Physics Education*, v. **22**, n. 4, p. 213-216, 1979.

ROSA, P. R. O Uso de Computadores no Ensino de Física. Parte I: Potencialidades e Uso Real. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. v. **17**, n. 2, p. 182-195, 1995.

_____. O Uso dos Recursos Audiovisuais e o Ensino de Ciências. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. **17**, n.1, p.33, 2000.

ROWELL, J. A. Piagetian Epistemology: Equilibration and the Teaching of Science. *Synthese* v. **80**, p. 141-162, 1989.

ROWEL, J. A. e DAWSON, C. Equilibration, Conflict and Instruction: A New Class-Oriented Perspective, *European Journal of Science Education*, v. **7**, n. 3, p. 331-344, 1984.

RYDER, L. H. From Newton to Einstein. *Physics Education*, v. **22**, n. 6, p. 342, 1987.

SANTOS, V. H. Relatividade e Realidade. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 3, n. 2, p. 83-83, 1986.

SCHERR, R. E., SHAFFER, P. S. e VOKOS, S. Student Understanding of Time in Special Relativity: Simultaneity and Reference Frames. *American Journal of Physics*, v. 69, n. 7, p. S24-S35, 2001.

_____. The Challenge of Changing Deeply Held Student Beliefs about the Relativity of Simultaneity. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 12, p. 1238-1248, 2002.

SCHWARTZ, J. *O momento criativo*. São Paulo: Editora Best Seller, 1992.

SCOTT, P.H. Planning Secondary School Science Teaching with Children's Thinking in Mind. *The proceedings of Third International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Ithaca, NY, 1993.

SILVEIRA, F. L. A Metodologia dos Programas de Pesquisa: A Epistemologia de Imre Lakatos. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 13, n. 3, p. 219-230, 1996.

SOUZA, C. A., BASTOS, F. P. e ANGOTTI, J. A. P. As Mídias e suas possibilidades: desafios para o novo educador. *Ata Eletrônica do II ENPEC*. Valinhos – SP, 1999.

STANNARD, R. *O Tempo e o Espaço do tio Alberto*. Trad. A. M. Nunes dos Santos e Christopher Aurette. Lisboa: Edições 70, 1989.

STACHEL, J. (org.) *O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001.

STRYKE, K. A.; POSNER G. J. A Revisionist Theory of Conceptual Change. In: DUSCHL R. E HAMILTON, R (eds.) *Philosophy of Science. Cognitive Psychology and Educational Theory and Practice* Albany: Sunny Press, 1992.

STUDART, N. A invenção do conceito de quantum de energia segundo Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. 22, n. 4, p. 523-535, 2000.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola do 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

_____. *Perspectivas para a inserção de física moderna na Escola Média*. São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Educação – USP, 1994. Tese de doutorado.

TERRAZZAN, E. A. e AULER, D. Repensando a Física no Ensino Médio. *Formação de Professores: um Desafio*, Goiânia: Editora da Universidade Católica de Goiás, 1996.

VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

_____. *Obras Escogidas - Tomo III*, Madrid: Visor Distribuciones, 1995.

VILLANI, A O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. Parte I: A revolução einsteiniana. *Revista de Ensino de Física*, v. **3**, n. 1, p. 31-45, 1981.

_____. Conceptual Change in Science and Science Education, *Science Education*, v. **76**, n. 2, p. 223-237, 1992.

VILLANI, A. e ARRUDA, S. Sobre as origens da relatividade especial: relações entre quanta e relatividade em 1905 *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. **13**, n. 1, p. 32-46, 1996.

_____. Special Theory of Relativity, Conceptual Change and History of Science. *Science & Education* v. **7**, p. 85 – 100, 1998.

VILLANI A. e PACCA, J. L. A. Spontaneous reasoning of graduate students. *International Journal of Science Education*, v. **12**, n. 5, p. 589-600, 1990.

_____. Como Avaliar um Projeto de Pesquisa em educação em Ciências? *Investigações em Ensino de Ciências*, IFURGS, Porto Alegre, v. **6**, n. 1, 2001. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol6/n1/v6_n1_a1.htm> Acesso em 13 de julho de 2004.

VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. São Paulo: Martins Fontes, 1994

_____. *Obras Escogidas - Tomo III*. Madrid: Visor Distribuciones, 1995

YAMAMOTO I. e BARBETA V. B. Simulações de Experiências como Ferramenta de Demonstração Virtual em Aulas de Teoria de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. **23**, n. 2, p. 215-225, 2001.

ZANETIC, J. *Física Também é Cultura* Tese de doutorado, São Paulo, 1989.

ANEXOS

ANEXO 1 – PRÉ-TESTE ESTUDO PILOTO

Nome: _____ Idade: _____

“Tempo, tempo,
mano velho,
falta um tanto ainda eu sei,
pra você correr macio...”

QUESTÃO 1

Pato Fu

Santo Agostinho, famoso teólogo que viveu no século V, disse certa vez: “Sei muito bem o que é o tempo - até que alguém me pergunte”.

1.1 Longe de buscarmos uma definição precisa sobre o conceito de tempo, e apesar de utilizarmos a palavra tempo em nosso dia-a-dia, pedimos que você leia atentamente as frases que seguem e marque com um X a(s) que mais se aproxima(m) da idéia de tempo que você tem.

- () “Nossa, que aula chata! Parece que o **tempo** não passa”.
- () “Sabe quanto **tempo** eu levei para voltar da praia no domingo? Duas horas!”
- () “Desculpe-me, mas hoje estou sem **tempo**”.
- () “O **tempo** passa, não temos como impedir”.
- () “Qual é a previsão do **tempo** para o final de semana?”
- () “O fim dos **tempos** está próximo”.
- () “É **tempo** de paz entre os povos”.
- () “**Tempo** é dinheiro”.
- () “Todas as luzes da praça acenderam ao mesmo **tempo**”.

1.2 Explique por que você escolheu esta(s) frase(s).

QUESTÃO 2

Quando você olha para o espelho pela manhã, para fazer a barba ou a maquiagem, sente que o tempo está passando. Você pode pensar um pouco no assunto olhando para sua própria imagem, mas logo outros pensamentos vão distrair sua atenção. O mundo lá fora te chama. O despertador toca. Acabou o tempo, você deve sair logo senão chegará atrasado na escola. Cazuza já dizia que “**o tempo não pára**”. Quem ainda poderia duvidar disso?

2.1 Sendo assim, se a passagem do tempo é uma característica da percepção humana, pois sentimos que o tempo flui, podemos comparar esse mesmo fluxo ao vôo de uma flecha ou ao movimento eterno das águas de um rio. Essa comparação é válida? Podemos afirmar que o tempo flui do passado para o futuro? Qual a sua opinião sobre isto?

2.2 Quando olhamos para o céu, durante uma noite estrelada, estamos observando o:

- () Passado
- () Presente
- () Futuro

Por quê?

2.3 Observando essa mesma bela noite estrelada, você percebe que duas estrelas se apagam ao mesmo tempo. Podemos afirmar que todos os observadores, **em qualquer lugar do universo**, verão essas mesmas duas estrelas se apagando ao mesmo tempo? Justifique sua resposta.

QUESTÃO 3

O tempo é medido pelo relógio através de processos físicos que envolvem a repetição. A própria sucessão de dias e noites já nos dá uma forma de medirmos o tempo.

A precisão na medida do tempo foi aumentando de acordo com as necessidades sociais. Os egípcios criaram os primeiros calendários para prever a duração das estações e, conseqüentemente, as cheias do Rio Nilo, que afetavam diretamente sua agricultura. Os relógios foram sendo aprimorados: de relógios solares, ampulhetas e relógios de água, passando por relógios que envolvem processos mecânicos, como os de pêndulo, até os atuais e superprecisos relógios atômicos.

3.1 Dois relógios idênticos são utilizados para medir o tempo gasto por Rubens Barrichello para completar uma volta do Grande Prêmio do Brasil em Interlagos. Um dos relógios está com uma pessoa que está parada na linha de chegada e o outro está no interior do carro de Rubinho. Você acha que estes dois relógios marcarão o mesmo tempo para a volta? Justifique.

3.2 Imagine que você esteja assistindo, em sua casa, à final do campeonato estadual de futebol. Um jogador de seu time cobra uma falta com extrema precisão e coloca a bola “no ângulo”, fazendo um gol. Podemos dizer que você começa a comemorar o gol no mesmo instante que a torcida que está presente no estádio? Justifique.

QUESTÃO 4

4.1 Numa tempestade ouvimos o som do trovão só algum tempo depois de vermos o relâmpago. Como você pode explicar essa afirmação?

4.2 Em uma festa de comemoração do ano novo, dois amigos, Rafael e Fábio, observam um maravilhoso espetáculo de fogos de artifício. Os dois notam que a luz emitida pela explosão é percebida antes do som produzido pela mesma. Será que a luz é transmitida imediatamente do ponto onde ocorreu a explosão aos nossos olhos? Os dois têm opiniões distintas para esta questão. Observe o diálogo entre os amigos:

Rafael: *Qual será o valor da velocidade da luz? Será finita ou infinita? Será que podemos fazer uma experiência para medir a velocidade da luz?*

Fábio: *Pô Rafa, que história é essa? É fácil perceber que a propagação da luz é instantânea. Quando vemos, à distância, a explosão do foguete, a claridade chega aos nossos olhos imediatamente, o que não ocorre com o som, que chega aos nossos ouvidos um pouco depois.*

Rafael: *Calma lá Fábio! Isso só prova que o som chega aos nossos ouvidos num tempo maior que aquele gasto pela luz. Porém, não garante que o movimento da luz seja instantâneo. Assim, penso que a luz gasta também um certo tempo para chegar aos nossos olhos, mas é tão pequeno que não conseguimos perceber.*

No desenrolar da conversa, os amigos apresentaram opiniões diferentes sobre a velocidade da luz. Qual a sua opinião a esse respeito? Você concorda com algum dos amigos? Justifique.

QUESTÃO 5

Imagine agora a seguinte situação: Rafael está parado em relação ao solo e observa um ônibus que se desloca em movimento retilíneo e uniforme em relação a ele. No interior desse ônibus, sentado em uma poltrona, se encontra Fábio. Suponha que o ônibus seja totalmente transparente, de tal forma que Rafael consiga ver tudo o que acontece em seu interior.

5.1 Os dois amigos observam uma determinada poltrona do ônibus. Para Rafael esta poltrona está em movimento ou em repouso? E para Fábio? Justifique sua resposta.

5.2 Uma lâmpada se desprende do teto do ônibus em direção ao chão. Qual é a forma da trajetória descrita pela lâmpada durante a sua queda vista por Fábio? E por Rafael? Justifique sua resposta fazendo um desenho que representa a trajetória da lâmpada vista por Fábio e por Rafael. Considere **desprezível a resistência do ar**.

5.3 Quando anoitece, o motorista decide acender as luzes do interior do ônibus. Para Fábio, todas as luzes são acesas ao mesmo tempo? Rafael terá essa mesma impressão? Justifique.

5.4 Se as cortinas do ônibus fossem todas fechadas e se o mesmo não emitisse nenhum barulho, Fábio teria como se certificar que o ônibus está em movimento?

Se não, por quê?

Se sim, de que maneira?

5.5 Suponha que o ônibus se desloque em relação ao solo com uma velocidade de 10 km/h. Se Fábio se deslocar com uma velocidade de 2 km/h em relação ao ônibus, qual será sua velocidade quando observado por Rafael? Justifique.

QUESTÃO 6

O múon é uma partícula carregada de carga igual à do elétron e massa duzentas vezes maior. Em laboratório, sob determinadas condições, essas partículas são criadas e logo se desintegram. A desintegração ocorre em apenas $2,2 \times 10^{-6}$ s, que é chamado tempo de vida do múon.

6.1 Supondo que este múon se desloque com velocidade $v = 3 \times 10^8$ m/s, qual a distância que ele percorreria neste tempo?

6.2 Por outro lado, sabe-se que essas partículas são produzidas quando raios cósmicos, que são radiações vindas do espaço, colidem com os núcleos de partículas que compõem a atmosfera da Terra. Sabendo que estas colisões ocorrem a uma altitude de 10 km, seria possível observá-los na superfície da Terra? Explique.

QUESTÃO 7

7. Uma criança constrói um belo castelo de areia. Assim que ela termina sua construção podemos dizer que o castelo passou a existir no espaço, isto é, o mesmo ocupa um certo lugar. Podemos dizer também que ele começou a existir no tempo, isto é, passou a ter uma duração?

ANEXO 2 – TEXTO *EM ABSOLUTO!*

ANEXO 3 – MÚSICA *SEMANA QUE VEM* - PITY

Amanhã eu vou revelar
Depois eu penso em aprender
Daqui a uns dias eu vou dizer
O que me faz querer gritar

No mês que vem tudo vai melhorar
Só mais alguns anos e o mundo vai mudar
Ainda temos tempo até tudo explodir
Quem sabe quanto vai durar

Não deixe nada pra depois
Não deixe o tempo passar
Não deixe nada pra semana que vem
Porque semana que vem pode nem chegar

A partir de amanhã eu vou discutir
Da próxima vez eu vou questionar
Na segunda eu começo a agir
Só mais duas horas pra eu decidir

Não deixe nada pra depois
Não deixe o tempo passar
Não deixe nada pra semana que vem
Porque semana que vem pode nem chegar

Esse pode ser o último dia de nossas vidas
Última chance de fazer tudo ter valido a pena
Diga sempre tudo o que precisa dizer
Arrisque mais pra não se arrepender
Nós não temos todo o tempo do mundo
E esse mundo já faz muito tempo
O futuro é o presente, e o presente já passou

Nada pra depois, não deixe o tempo passar
Não deixe nada pra semana que vem
Porque semana que vem pode nem chegar

ANEXO 4 – TEXTO *ALTA PRECISÃO* – ANDREWES

ANEXO 5 – TEXTO *BETO CONQUISTA O TEMPO*

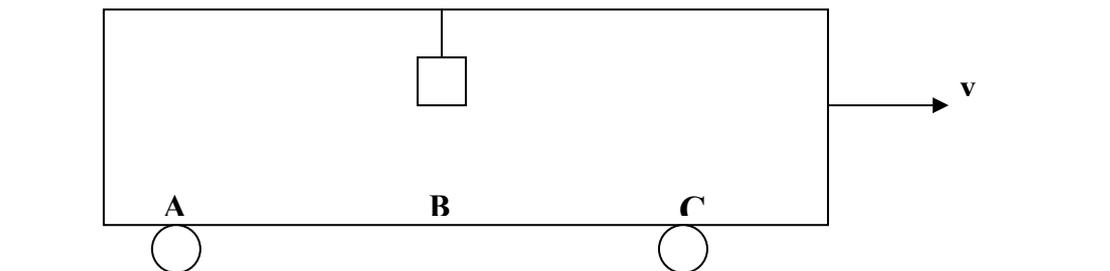
ANEXO 6 – PÓS-TESTE ESTUDO PILOTO

Nome: _____ Idade: _____

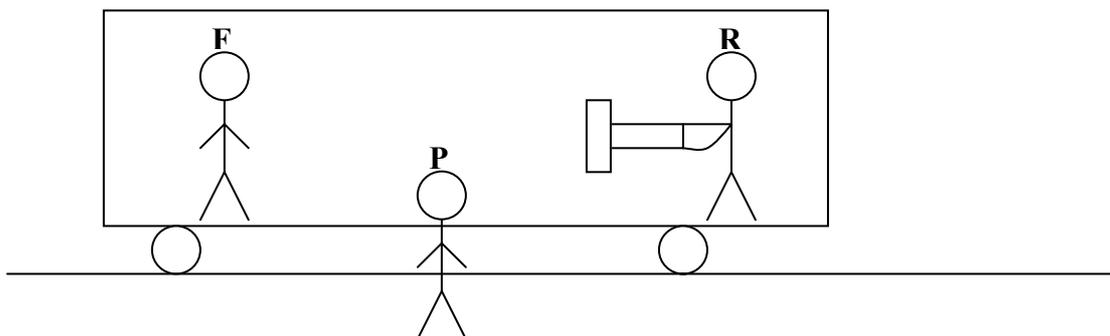
1. O ônibus movimenta-se por uma estrada retilínea como mostra a figura. Num dado instante, um pacote se desprende do topo do ônibus e cai no chão. Em que ponto o pacote deverá cair quando o ônibus:

- a) estiver em repouso em relação ao solo;
- b) estiver se deslocando com velocidade constante de 100 km/h;
- c) estiver se deslocando com velocidade constante de 10000 km/h.

Justifique suas respostas.



2. Imagine a seguinte situação: dois amigos, Fábio e Rafael, estão dentro de um vagão. Rafael, à direita, segura uma lanterna e quando a acende, raios de luz partem da lanterna na direção de Fábio. Considere a velocidade da luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s. Justificando cada item, responda às questões abaixo.



2.1 Para Fábio, qual será a velocidade da luz quando:

- a) ele está em repouso em relação à Rafael;
- b) ele se move para a direita com velocidade de 5 m/s;
- c) ele se move para a esquerda com velocidade de 3 m/s.

Considere que o vagão esteja em repouso em relação ao solo.

2.2 Suponha agora que um terceiro amigo, Pedro, encontre-se fora do vagão e em repouso em relação ao solo. Para Pedro, qual será a velocidade da luz que parte da lanterna de Rafael, quando:

- a) o vagão se mover para a esquerda com uma velocidade de 50 m/s;
- b) o vagão se mover para a direita com uma velocidade de 40 m/s.

3. Durante nossas aulas, vimos uma famosa experiência da história da física que ficou conhecida como a experiência de Michelson-Morley, em homenagem aos seus principais idealizadores. Explique essa experiência com suas palavras, destacando qual era o seu principal objetivo. Ele foi atingido? Por quê?

4. O múon é uma partícula carregada de carga igual à do elétron e massa duzentas vezes maior. Os múons são instáveis e decaem rapidamente. Quando em repouso, o tempo medido para sua desintegração é de aproximadamente dois microssegundos.

Em uma experiência realizada no acelerador de partículas do laboratório CERN, os múons foram acelerados até atingirem uma velocidade equivalente a 90% da velocidade da luz. Deslocando-se a esta velocidade, o tempo medido para sua desintegração também será de dois microssegundos? Justifique.

5. Utilizando relógios atômicos idênticos e inicialmente sincronizados, dois observadores medem a duração de um mesmo evento e encontram 5 minutos e 7 minutos respectivamente. Dê uma possível explicação para este fato.

6. Na sua opinião, as atividades realizadas contribuíram de alguma forma para mudar a idéia de tempo que você tinha anteriormente? Se sim, quais foram as principais mudanças e como as atividades contribuíram para que elas ocorressem? Se não, o que você sugere que pode ser melhorado?

ANEXO 7 – TESTE DE RETENÇÃO ESTUDO PILOTO

Nome: _____ Idade: _____

QUESTÃO 1

Santo Agostinho, famoso teólogo que viveu no século V, disse certa vez: “Sei muito bem o que é o tempo - até que alguém me pergunte”.

1.1 Longe de buscarmos uma definição precisa sobre o conceito de tempo, e apesar de utilizarmos a palavra tempo em nosso dia-a-dia, pedimos que você leia atentamente as frases que seguem e marque com um X a(s) que mais se aproxima(m) da idéia de tempo que você tem.

- a. () O **tempo** não passa na aula do professor Chatonildo!
- b. () O atleta completou a prova em um **tempo** de 1 hora 45 minutos e 37 segundos.
- c. () O **tempo** passa, não temos como impedir.
- d. () O **tempo** dirá e não há o que você possa fazer para mudar.
- e. () Se eu for duas vezes mais rápido, levarei a metade do **tempo** para chegar em casa.
- f. () Todas as luzes da praça acenderam ao mesmo **tempo**.
- g. () Não temos todo o **tempo** do mundo, o amanhã pode nem chegar!
- h. () O **tempo** passa mais devagar nos relógios em movimento.
- i. () O **tempo** se revela como um filme, quadro a quadro.

1.2 Explique, para **cada uma** das frases que assinalou, qual é o significado da palavra tempo que você tem em mente.

1.3 Escreva com suas próprias palavras: o que é tempo para você?

QUESTÃO 2

Quando você olha para o espelho pela manhã, para fazer a barba ou a maquiagem, sente que o tempo está passando. Você pode pensar um pouco no assunto olhando para sua própria imagem, mas logo outros pensamentos vão distrair sua atenção. O mundo lá fora te chama. O despertador toca. Acabou o tempo, você deve sair logo senão chegará atrasado na escola.

2.1 Se a passagem do tempo é uma característica da percepção humana, pois sentimos que o tempo flui, podemos comparar esse mesmo fluxo ao vôo de uma flecha ou ao movimento eterno das águas de um rio. Essa comparação é válida? Podemos afirmar que o tempo flui do passado para o futuro? Qual a sua opinião sobre isto?

2.2 Sir Isaac Newton, um dos maiores físicos de todos os tempos, escreveu:

“O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui uniformemente, sem relação com nenhuma coisa externa, e é também chamado de duração”.

Qual a sua opinião sobre esta idéia de tempo? Explique.

2.3 Quando olhamos para o céu, durante uma noite estrelada, estamos observando o:

- () Passado
- () Presente
- () Futuro

Por quê?

2.4 Observando essa mesma bela noite estrelada, você percebe que duas estrelas se apagam ao mesmo tempo. Podemos afirmar que todos os observadores, **em qualquer lugar do universo**, verão essas mesmas duas estrelas se apagando ao mesmo tempo? Justifique sua resposta.

QUESTÃO 3

O tempo é medido pelo relógio através de processos físicos que envolvem a repetição. A própria sucessão de dias e noites já nos dá uma forma de medirmos o tempo.

A precisão na medida do tempo foi aumentando de acordo com as necessidades sociais. Os egípcios criaram os primeiros calendários para prever a duração das estações e, conseqüentemente, as cheias do Rio Nilo, que afetavam diretamente sua agricultura. Os relógios foram sendo aprimorados: de relógios solares, ampulhetas e relógios de água, passando por relógios que envolvem processos mecânicos, como os de pêndulo, até os atuais e superprecisos relógios atômicos.

3.1 Se todos os relógios do mundo quebrassem e não houvesse dias e noites, ainda haveria tempo? Qual a sua opinião sobre isto?

3.2 Existem várias unidades utilizadas para medir tempo. As mais conhecidas são as horas, os minutos e os segundos. Entretanto, como citado no texto acima, a precisão dos relógios tem aumentado. Existem relógios que medem milésimos, milionésimos e até bilionésimos de segundo. Você acha que existe um limite para isso, ou sempre podemos criar relógios cada vez mais precisos? Será que existe uma unidade de tempo que seja indivisível? Explique.

QUESTÃO 4

Imagine agora a seguinte situação: Rafael está parado em relação ao solo e observa um ônibus que se desloca em movimento retilíneo e uniforme em relação a ele. No interior desse ônibus, sentado em uma poltrona, se encontra Fábio. Suponha que o ônibus seja totalmente transparente, de tal forma que Rafael consiga ver tudo o que acontece em seu interior.

4.1 Os dois amigos observam uma determinada poltrona do ônibus. Para Rafael esta poltrona está em movimento ou em repouso? E para Fábio? Justifique sua resposta.

4.2 Uma lâmpada se desprende do teto do ônibus em direção ao chão. Qual é a forma da trajetória descrita pela lâmpada, durante a sua queda, quando vista por Fábio? E por Rafael? Justifique sua resposta fazendo um desenho que representa a trajetória da lâmpada vista por Fábio e por Rafael. Considere **desprezível a resistência do ar**.

DESENHO

4.3 Quando anoitece, o motorista decide acender as luzes do interior do ônibus. Para Fábio, todas as luzes são acesas ao mesmo tempo? Rafael terá essa mesma impressão? Justifique.

4.4 Se as cortinas do ônibus fossem todas fechadas e se o mesmo não emitisse nenhum barulho, Fábio teria como se certificar que o ônibus está em movimento?

Se não, por quê?

Se sim, de que maneira?

4.5 Suponha que o ônibus se desloque em relação ao solo com uma velocidade de 10 km/h. Se Fábio se deslocar com uma velocidade de 2 km/h em relação ao ônibus, qual será sua velocidade quando observado por Rafael? Justifique.

QUESTÃO 5

Os dois irmãos da foto abaixo, Brad à esquerda, e Pitt, à direita, são entrevistados por um repórter:

- Vocês são irmãos gêmeos?

Eles prontamente respondem:

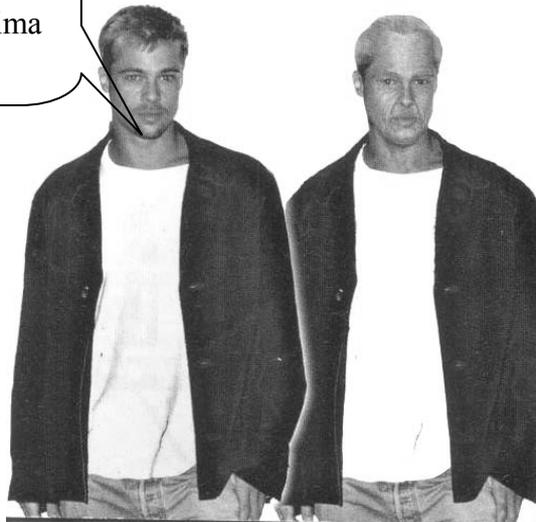
- Sim!

O repórter, com certa desconfiança, indaga:

- Mas, sinceramente, não parece. Diga pra nós Brad, qual é o seu segredo?

E ele responde:

Exercícios diários,
alimentação saudável
e viagens em altíssima
velocidade!



Comente a justificativa de Brad.

ANEXO 8 – PRÉ-TESTE ESTUDO FINAL

Nome: _____ Idade: _____

“Tempo, tempo,
mano velho,
falta um tanto ainda eu sei,
pra você correr macio...”

Pato Fu

QUESTÃO 1

Santo Agostinho, famoso teólogo que viveu no século V, disse certa vez: “Sei muito bem o que é o tempo - até que alguém me pergunte”.

1.1 Longe de buscarmos uma definição precisa sobre o conceito de tempo, e apesar de utilizarmos a palavra tempo em nosso dia-a-dia, pedimos que você leia atentamente as frases que seguem e marque com um X a(s) que mais se aproxima(m) da idéia de tempo que você tem.

- a. () O **tempo** não passa na aula do professor Chatonildo!
- b. () O atleta completou a prova em um **tempo** de 1 hora 45 minutos e 37 segundos.
- c. () O **tempo** passa, não temos como impedir.
- d. () O **tempo** dirá e não há o que você possa fazer para mudar.
- e. () Se eu for duas vezes mais rápido, levarei a metade do **tempo** para chegar em casa.
- f. () Todas as luzes da praça acenderam ao mesmo **tempo**.
- g. () Não temos todo o **tempo** do mundo, o amanhã pode nem chegar!
- h. () O **tempo** passa mais devagar nos relógios em movimento.
- i. () O **tempo** se revela como um filme, quadro a quadro.

1.2 Explique, para **cada uma** das frases que assinalou, qual é o significado da palavra tempo que você tem em mente.

1.3 Escreva com suas próprias palavras: o que é tempo para você?

QUESTÃO 2

Quando você olha para o espelho pela manhã, para fazer a barba ou a maquiagem, sente que o tempo está passando. Você pode pensar um pouco no assunto olhando para sua própria imagem, mas logo outros pensamentos vão distrair sua atenção. O mundo lá fora te chama. O despertador toca. Acabou o tempo, você deve sair logo senão chegará atrasado na escola.

2.1 Se a passagem do tempo é uma característica da percepção humana, pois sentimos que o tempo flui, podemos comparar esse mesmo fluxo ao vôo de uma flecha ou ao movimento eterno das águas de um rio. Essa comparação é válida? Podemos afirmar que o tempo flui do passado para o futuro? Qual a sua opinião sobre isto?

2.2 Sir Isaac Newton, um dos maiores físicos de todos os tempos, escreveu:

“O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui uniformemente, sem relação com nenhuma coisa externa, e é também chamado de duração”.

Qual a sua opinião sobre esta idéia de tempo? Explique.

2.3 Quando olhamos para o céu, durante uma noite estrelada, estamos observando o:

- () Passado
- () Presente
- () Futuro

Por quê?

2.4 Observando essa mesma bela noite estrelada, você percebe que duas estrelas se apagam ao mesmo tempo. Podemos afirmar que todos os observadores, **em qualquer lugar do universo**, verão essas mesmas duas estrelas se apagando ao mesmo tempo? Justifique sua resposta.

QUESTÃO 3

O tempo é medido pelo relógio através de processos físicos que envolvem a repetição. A própria sucessão de dias e noites já nos dá uma forma de medirmos o tempo.

A precisão na medida do tempo foi aumentando de acordo com as necessidades sociais. Os egípcios criaram os primeiros calendários para prever a duração das estações e, conseqüentemente, as cheias do Rio Nilo, que afetavam diretamente sua agricultura. Os relógios foram sendo aprimorados: de relógios solares, ampulhetas e relógios de água, passando por relógios que envolvem processos mecânicos, como os de pêndulo, até os atuais e superprecisos relógios atômicos.

3.1 Se todos os relógios do mundo quebrassem e não houvesse dias e noites, ainda haveria tempo? Qual a sua opinião sobre isto?

3.2 Um décimo de segundo é um segundo dividido em dez partes iguais, certo? Da mesma forma, um milésimo de segundo é um segundo dividido em mil partes iguais, um milionésimo de segundo é um segundo dividido em um milhão de partes iguais e assim por diante... Você acha que existe uma unidade de tempo que seja indivisível? Por que?

3.3 Imagine que você esteja assistindo, em sua casa, à final do campeonato estadual de futebol. Um jogador de seu time cobra uma falta com extrema precisão e coloca a bola “no ângulo”, fazendo um golaço. Podemos dizer que você começa a comemorar o gol no mesmo instante que a torcida que está presente no estádio? Justifique.

QUESTÃO 4

4.1 Numa tempestade ouvimos o som do trovão só algum tempo depois de vermos o relâmpago. Como você pode explicar essa afirmação?

4.2 Em uma festa de comemoração do ano novo, dois amigos, Rafael e Fábio, observam um maravilhoso espetáculo de fogos de artifício. Os dois notam que a luz emitida pela explosão é percebida antes do som produzido pela mesma. Será que a luz é transmitida imediatamente do ponto onde ocorreu a explosão aos nossos olhos? Os dois têm opiniões distintas para esta questão. Observe o diálogo entre os amigos:

***Rafael:** Qual será o valor da velocidade da luz? Será finita ou infinita? Será que podemos fazer uma experiência para medir a velocidade da luz?*

***Fábio:** Pô Rafa, que história é essa? É fácil perceber que a propagação da luz é instantânea. Quando vemos, à distância, a explosão do foguete, a claridade chega aos nossos olhos imediatamente, o que não ocorre com o som, que chega aos nossos ouvidos um pouco depois.*

***Rafael:** Calma lá Fábio! Isso só prova que o som chega aos nossos ouvidos num tempo maior que aquele gasto pela luz. Porém, não garante que o movimento da luz seja instantâneo. Assim, penso que a luz gasta também um certo tempo para chegar aos nossos olhos, mas é tão pequeno que não conseguimos perceber.*

No desenrolar da conversa, os amigos apresentaram opiniões diferentes sobre a velocidade da luz. Qual a sua opinião a esse respeito? Você concorda com algum dos amigos? Justifique.

QUESTÃO 5

Imagine agora a seguinte situação: Rafael está parado em relação ao solo e observa um ônibus que se desloca em movimento retilíneo e uniforme em relação a ele. No interior desse ônibus, sentado em uma poltrona, se encontra Fábio. Suponha que o ônibus seja totalmente transparente, de tal forma que Rafael consiga ver tudo o que acontece em seu interior.

5.1 Os dois amigos observam uma determinada poltrona do ônibus. Para Rafael esta poltrona está em movimento ou em repouso? E para Fábio? Justifique sua resposta.

5.2 Uma lâmpada se desprende do teto do ônibus em direção ao chão. Qual é a forma da trajetória descrita pela lâmpada, durante a sua queda, quando vista por Fábio? E por Rafael? Justifique sua resposta fazendo um desenho que representa a trajetória da lâmpada vista por Fábio e por Rafael. Considere **desprezível a resistência do ar**.

DESENHO

5.3 Quando anoitece, o motorista decide acender as luzes do interior do ônibus. Para Fábio, todas as luzes são acesas ao mesmo tempo? Rafael terá essa mesma impressão? Justifique.

5.4 Se as cortinas do ônibus fossem todas fechadas e se o mesmo não emitisse nenhum barulho, Fábio teria como se certificar que o ônibus está em movimento?

Se não, por quê?

Se sim, de que maneira?

5.5 Suponha que o ônibus se desloque em relação ao solo com uma velocidade de 10 km/h. Se Fábio se deslocar com uma velocidade de 2 km/h em relação ao ônibus, qual será sua velocidade quando observado por Rafael? Justifique.

QUESTÃO 6

Os dois irmãos da foto abaixo, Brad à esquerda, e Pitt, à direita, são entrevistados por um repórter:

- Vocês são irmãos gêmeos? – perguntou o repórter.

Eles prontamente respondem:

- Sim!

O repórter, com certa desconfiança, indaga:

- Mas, sinceramente, não parece. Diga pra nós Brad, qual é o seu segredo?

E ele responde:

Exercícios diários,
alimentação saudável
e viagens em altíssima
velocidade!



Qual a sua opinião sobre a justificativa de Brad?

ANEXO 9 – MÚSICA *MELHOR PRÁ MIM* - LEONI

Olhando as estrelas
Nada no espaço
Fica parado no lugar
A terra se move
Os carros na estrada
Eu dentro de um deles
Corro mais só pra te encontrar

Olhando o relógio
O tempo não passa
Quando eu me afasto de você
Mas se de repente ele fica apressado
E as horas disparam
É só porque encontrei você

E aí tudo muda
Olhando pro céu
E aí tudo muda
Penso em você e eu

A ciência confirma os fatos que o coração descobriu
Nos seus braços sempre me esqueço de tempo, espaço e no fim
Tudo é relativo quando te fazer feliz me faz feliz
Se a história for sempre assim
Melhor pra mim

Olhando as pessoas
Falando de espaço
Mantendo distância sem saber
Que antigas verdades viraram mentiras
E nada protege de uma paixão vir acontecer

E aí tudo muda
Olhando pro céu
E aí tudo muda
Penso em você e eu

A ciência confirma os fatos que o coração descobriu
Nos seus braços sempre me esqueço de tempo, espaço e no fim
Tudo é relativo quando te fazer feliz me faz feliz
Se a história for sempre assim
Melhor pra mim

ANEXO 10 – TABELA EVOLUÇÃO DOS RELÓGIOS

HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DOS RELÓGIOS

3000 a.C.	RELÓGIO DE SOL
1500 a.C.	CLEPSIDRA
950 a.C.	DIA E ANO SOLAR
250 d.C.	RELÓGIOS DE AREIA
1290	RELÓGIOS MECÂNICOS
1582	GALILEU E O PÊNDBULO
1585	RELÓGIO COM CORDA
1650	HUYGHENS E O PÊNDBULO
1761	RELÓGIO NO NAVIO
1790	RELÓGIOS DE BOLSO
1900	RELÓGIO DE PULSO
1930	CRISTAL DE QUARTZO
1948	RELÓGIO ATÔMICO

EVOLUÇÃO DA PRECISÃO

ANO	INVENTOR	MECANISMO	ATRASSO
1890	Riefler	pênbdulo a vácuo	0,1 s por dia
1920	Shortt	mestre regulador	1 s por ano
1928	Morrison	crystal de quartzo	0,002 s por dia
1948	Lyons	relógio atômico - césio	1.10^{-9} s por dia

ANEXO 11 – TABELA VELOCIDADES

VELOCIDADES

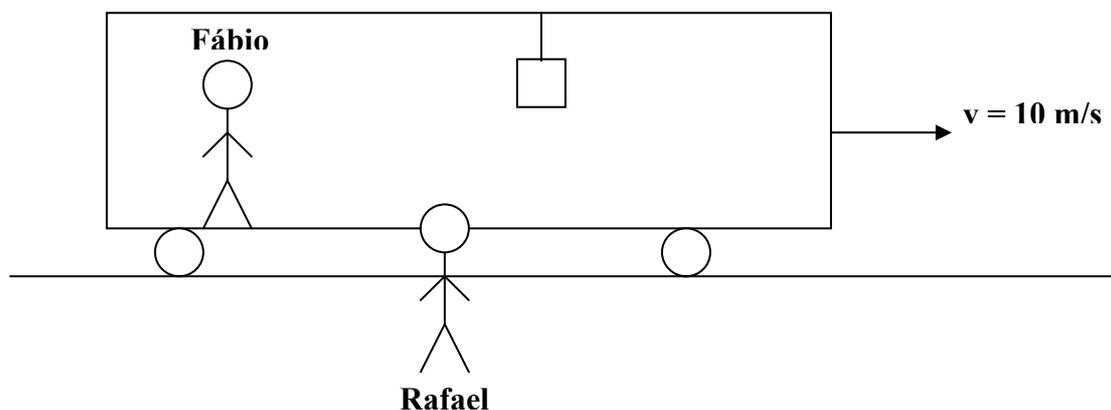
	km/h
LESMA	0,002
HOMEM	3
CARRO	110
FÓRMULA 1	350
AVIÃO	900
SOM	1.224
THRUST SSC	1.233
TERRA (ROT)	1.675
BLACKBIRD	3.500
X - 43	7.700
FOGUETES	18.300
ESCAPE	54.614
TERRA (TRANS)	108.000
SONDA HELIOS	252.800
LUZ	1.080.000.000

ANEXO 12 – TESTE EM PROCESSO ESTUDO FINAL

Nome: _____ Data: _____

1. Um ônibus se movimenta sobre uma estrada plana e retilínea com velocidade constante de 10 m/s em relação ao solo. Fábio está dentro do mesmo e Rafael está fora. Um pacote está preso a um fio no teto do ônibus. Sobre esta situação, que está representada na figura abaixo, responda:

- Fábio está em movimento? Justifique.
- Se o fio se romper e o pacote cair, como esta queda será vista por Fábio? E por Rafael? Represente estas trajetórias através de desenhos.
- Sem olhar para fora, Fábio teria como saber se está em movimento?



2. Em nossas aulas dedicamos um pouco de tempo para a discussão sobre o tempo.

- Estas discussões mudaram de alguma maneira a sua idéia de tempo? Explique.
- Se você quisesse construir um relógio, como faria?
- Qual é o relógio mais preciso que existe? Este relógio consegue medir intervalos de tempo muito pequenos, qual é a sua precisão?

3. Um astrônomo, observando o céu em uma noite estrelada, viu o nascimento de uma estrela no ano de 2004. Após fazer alguns cálculos, ele concluiu que a mesma nasceu no dia 5 de maio de 1104. Sobre esta situação, responda:

- Explique por que a estrela não nasceu no ano de 2004?
- Todos os observadores do universo veriam a estrela nascer no mesmo instante? Justifique.

4. O recorde de velocidade em aviões foi batido recentemente pelo caça norte americano X-43 atingindo a incrível marca de 7700 km/h! Dizemos que ele é um Mach 7, ou seja, voa com uma velocidade 7 vezes maior que a velocidade do som! Em comparação com a luz, podemos dizer que o avião tem uma velocidade alta ou baixa? Explique.

5. Nas duas últimas aulas, estudamos um pouco sobre a história da Física, principalmente o período do final do século XIX. Vimos que, nesta época, a maioria dos cientistas acreditava que a Física já estava quase pronta, restando apenas resolver dois “probleminhas”.

- Que problemas eram esses?
- Os cientistas já sabiam que a luz tem uma velocidade altíssima. Esta velocidade seria em relação a que?
- Comentamos sobre uma famosa experiência da Física que ficou conhecida como a experiência de Michelson-Morley. Qual era o seu principal objetivo? Ele foi atingido?

ANEXO 13 – PÓS-TESTE ESTUDO FINAL

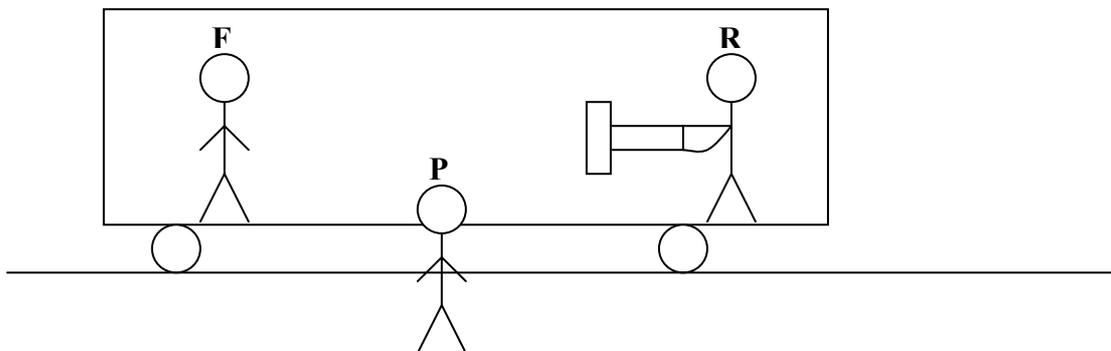
Nome: _____

1. Se você estivesse viajando dentro de uma nave espacial a uma velocidade constante em relação às estrelas e próxima à velocidade da luz, mas sem poder olhar para fora, você:

- a) poderia detectar seu movimento porque sua massa iria crescer.
- b) poderia detectar seu movimento porque seu coração ficaria mais lento.
- c) poderia detectar seu movimento porque você iria encolher.
- d) poderia detectar seu movimento por todos os motivos abordados nas afirmações acima.
- e) nunca poderia saber de fato se está se movendo ou não dentro da própria nave.

Justifique a opção escolhida

2. Imagine a seguinte situação: dois amigos, Fábio e Rafael, estão dentro de um vagão. Rafael, à direita, segura uma lanterna e quando a acende, um feixe de luz parte da lanterna na direção de Fábio. Considere a velocidade da luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s. Justificando cada item, responda às questões abaixo.



2.1 Para Fábio, qual será a velocidade da luz quando:

- d) ele está em repouso em relação à Rafael;
- e) ele se move para a direita com velocidade de 5 m/s;
- f) ele se move para a esquerda com velocidade de 3 m/s.

Considere que o vagão esteja em repouso em relação ao solo.

2.2 Suponha agora que um terceiro amigo, Pedro, encontre-se fora do vagão e em repouso em relação ao solo. Para Pedro, qual será a velocidade da luz que parte da lanterna de Rafael, quando:

- c) o vagão se move para a esquerda com uma velocidade de 50 m/s;
- d) o vagão se move para a direita com uma velocidade de 40 m/s.

3. Durante nossas aulas, vimos uma famosa experiência da história da física que ficou conhecida como a experiência de Michelson-Morley, em homenagem aos seus principais idealizadores. Explique essa experiência com suas palavras, destacando qual era o seu principal objetivo. Ele foi atingido? Por quê?

4. Vimos que a teoria da relatividade prevê “estranhos” efeitos como a dilatação do tempo e a contração do comprimento.

4.1 Conseguimos perceber estes efeitos em nosso dia-a-dia? Justifique.

4.2 Em sua opinião, esses efeitos existem mesmo? Por que você acha isso?

5. Os dois irmãos da foto abaixo, Brad à esquerda, e Pitt, à direita, são entrevistados por um repórter:

- Vocês são irmãos gêmeos? – perguntou o repórter.

Eles prontamente respondem:

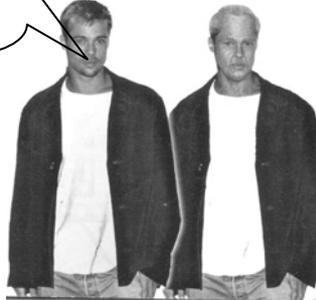
- Sim!

O repórter, com certa desconfiança, indaga:

- Mas, sinceramente, não parece. Diga pra nós Brad, qual é o seu segredo?

E ele responde:

Exercícios diários,
alimentação saudável
e viagens em altíssima
velocidade!



Qual a sua opinião sobre a justificativa de Brad?

6. Fábio Lesma tem que entregar um trabalho daqui a uma hora, como o professor lhe ordenou. Como sempre, Fábio atrasou-se. Não consegue acabar o trabalho dentro de uma hora. Entre as opções abaixo, o que Fábio poderia fazer para resolver este problema? Justifique sua opção.

- Fábio deverá fazer o trabalho dentro de uma nave que se desloca com altíssima velocidade em relação a Terra.
- Fábio deverá enviar o professor para uma viagem em altíssima velocidade.
- Os dois, Fábio e o professor, devem embarcar em uma nave que se desloca em alta velocidade.
- Nenhuma das opções acima resolveria o problema de Fábio, ele não acaba o trabalho em tempo de entregar a seu professor.

7. Dois irmãos gêmeos, Rick e Renner, têm, hoje, 30 anos. Rick entra em uma nave e parte para uma viagem espacial com uma velocidade de $0,8c$. Suponha que a viagem tenha durado 20 anos para Rick.

- Quanto tempo durou a viagem para Renner?
- Quais as idades dos irmãos depois da viagem?
- Se a nave possui 10 m de comprimento para Rick, qual é seu comprimento quando observada por Renner?

8. Durante o projeto, dedicamos bastante tempo para discutir sobre o que é tempo. Refletindo sobre estas discussões, responda, justificando cada item:

- Se todos os relógios do mundo quebrassem e não houvesse dias e noites, ainda haveria tempo?
- O tempo passa da mesma forma para todos?
- Em sua opinião, as atividades realizadas contribuíram de alguma forma para mudar a idéia de tempo que você tinha anteriormente?

9. Dê sua opinião geral sobre o projeto de ensino de relatividade desenvolvido em sua escola. A metodologia lhe agradou? O tempo foi suficiente? Os textos fornecidos foram acessíveis? As explicações foram claras? Que atividades mais gostou? O que poderia ser melhorado? Você acha que a relatividade deva ser ensinada no Ensino Médio? Por quê? Use este espaço para fazer sugestões, elogios e críticas gerais sobre o projeto.