

UMA RELEITURA METODOLÓGICA PARA O ENSINO DE RELATIVIDADE RESTRITA

Ricardo Avelar Sotomaior Karam e Sonia Maria Silva Correa de Souza Cruz
*Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica– Departamento de Física– Universidade
Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC*

Débora Coimbra

Departamento de Física– Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP

RESUMO

A partir da concepção de aprendizagem como a demarcação e a evolução das zonas de um perfil conceitual e a construção de novas faixas deste, avaliamos a pertinência de estratégias didáticas para a inserção de tópicos da Teoria da Relatividade Restrita no primeiro ano do Ensino Médio, disseminados justapostos aos conceitos de cinemática clássica, particularmente os de referencial e tempo. Esta proposta está em sintonia com o objetivo de inserir a Física Moderna e Contemporânea organicamente incorporada à apresentação e ao desenvolvimento das teorias clássicas e não apenas após o eletromagnetismo. Em relação aos aspectos metodológicos, este estudo oportunizou uma reinterpretação da metodologia dos três momentos pedagógicos, segundo as teorias de equilíbrio de Piaget e a sócio-interacionista de Vygotsky. A gravação em vídeo da implementação da seqüência didática realizada em uma escola da rede pública da cidade de Florianópolis, SC, permitiu acompanhar o processo e recortar episódios de ensino, os quais evidenciaram as dificuldades na construção de noções contra-intuitivas e uma progressiva evolução na qualidade da argumentação dos educandos ao longo do processo.

1. INTRODUÇÃO

O caráter polissêmico da educação escolar evidencia-se 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 do grupo de pertença dos participantes. 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.

No intuito de repensar a investigação pedagógica, é imperativo considerar como o conhecimento é construído na mente do indivíduo. As explicações dos estudantes desempenham um papel fundamental no processo de ensino e são essenciais para o desenvolvimento e análise da seqüência didática, direcionando um constante replanejamento da mesma. Defendemos a concepção de aprendizagem como a demarcação e evolução das zonas de um perfil conceitual e a construção de novas zonas deste, quando pertinente, estabelecendo uma coexistência de noções, aplicáveis em diferentes contextos, de acordo com a proposta de Mortimer (1996). 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.

Em função da conclamada necessidade da inserção de tópicos de física moderna em nível médio, concebemos e testamos uma intervenção de ensino objetivando adequar as propostas constantes na literatura à realidade acadêmica dos estudantes de uma escola pública da cidade de Florianópolis, SC (KARAM, 2005). Habitualmente, a primeira aproximação dos estudantes com a física ocorre por meio do ensino da Mecânica Newtoniana. Desta forma, neste trabalho, buscamos identificar como as formulações dos conceitos de espaço, tempo e velocidade influenciam no aprendizado da Teoria da Relatividade Restrita, uma vez que essa teoria propõe formulações distintas para os mesmos.

Existem várias abordagens para tratar a teoria da relatividade. Com o objetivo de aumentar a plausibilidade da relatividade para os estudantes, Villani e Arruda (1998) propõem uma analogia entre o processo histórico da construção da teoria e o de aprendizagem da mesma. Os autores sugerem iniciar pelo eletromagnetismo de Maxwell-Hertz, apresentar as experiências que questionavam as teorias clássicas, como o interferômetro de Michelson-Morley, comentar as divergências teóricas entre a Mecânica e o Eletromagnetismo e mencionar a compatibilidade entre

a Relatividade e a teoria do quantum. Seguindo a mesma linha histórica, Ryder (1987) delinea um paralelo entre a mecânica newtoniana, desde os experimentos propostos por Galileu e a influência dos mesmos na formulação de espaço e tempo absolutos, propostos por Newton. Em seguida, discute 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 newtoniana e introduzir a teoria da relatividade. Outras propostas não seguem a ordem histórica. Angotti *et al.* (1978) idealizaram e aplicaram uma seqüência que se destaca por iniciar apresentando aos alunos evidências experimentais da relatividade, como variação da massa de partículas aceleradas e a detecção de múons na superfície terrestre, e convidando os mesmos a formularem suas explicações, incitando, como proposto por Vygotsky, o conflito sócio-cognitivo. A menção a experiências com raios cósmicos e aceleradores de partículas no ensino de relatividade também é recomendada Rosser (1979) que sugere ainda, eliminar a discussão sobre o éter se os estudantes conhecerem o conceito de fóton e abordar a utilização de radares evidenciando que a luz tem velocidade finita. Enfatizando também aspectos tecnológicos, Muller (2000) apresenta uma interessante alternativa didática que, através da explicação 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.

Algumas das propostas analisadas são destinadas especificamente ao Ensino Médio. Rodrigues (2001) destaca-se por preconizar o ensino de alguns aspectos da relatividade durante todos os três anos e não apenas após o final do eletromagnetismo. O autor propõe que, para o primeiro ano, sejam tratadas as concepções de espaço e tempo relativísticas, para o segundo ano, sugere questionar a necessidade da existência do éter para a teoria ondulatória e para o último uma análise das inconsistências do princípio da relatividade quando aplicado ao eletromagnetismo. Hall (1978) defende 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 deste nível. Assim, o autor recomenda a experiência de Hafele-Keating como a 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. Para a abordagem das conseqüências da Relatividade Restrita e obtenção da dilatação temporal e contração do comprimento com alunos de Ensino Médio, Daly e Horton (1994) utilizam uma experiência de pensamento. A 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) verificaram que alunos que leram um texto de ficção científica - *O tempo e o espaço do Tio Alberto* (STANNARD, 1989) – tiveram um desempenho superior em relação aos que não o leram, evidenciando a proficuidade desta metodologia. Scherr *et al.* (2001) apresentaram uma investigação detalhada das pré-concepções dos estudantes acerca do conceito de tempo, sistemas de referência e simultaneidade, com estudantes submetidos a uma abordagem tradicional de tais tópicos. Esses autores constataram que permanece uma coexistência entre tais pré-concepções e o modelo científico estudado e sugeriram uma intervenção específica tratando dos temas tempo e simultaneidade, de modo que se vivenciassem alguns aspectos do conflito cognitivo (SHERR *et al.*, 2002).

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, reinterpretando elementos de sua base fundante, à luz da teoria de ensino-aprendizagem adotada.

2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS: OS MOMENTOS PEDAGÓGICOS

Inspirado na concepção freireana de ensino-aprendizagem, o primeiro momento pedagógico corresponde a uma caracterização dos grupos com quem se trabalha, quanto à suas pré-concepções e perfis conceituais. As perguntas formuladas pelos próprios alunos contribuem

expressivamente e devem ser incentivadas pelo professor, ao criar um ambiente favorável para o surgimento destes questionamentos. É nesse momento também que se deve fazer com que os educandos sintam a necessidade de adquirir outros conhecimentos para explicar as situações propostas. As perturbações lacunares ocorrem quando o sujeito nota que faltam objetos, condições ou informações para realizar uma ação. Isto é propiciado pela demarcação das zonas pré-existentes do perfil relativo a um dado conceito e a exposição a situações que não podem ser adequadamente explicadas à luz deles.

A sistematização dos conhecimentos de Física, através de definições, conceitos, relações e leis, é elaborada no segundo momento pedagógico. Para concretizá-la, faz-se necessário um afastamento crítico. 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. Ainda, esse afastamento permite interpretar os aspectos de sua própria experiência existencial, pela retomada, no terceiro momento pedagógico, das situações geradoras deflagradas no primeiro. 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. Em se tratando da abordagem de conceitos contra-intuitivos, Mortimer e Carvalho (1996) apontam o papel crucial da negociação social das idéias, destacando o papel do professor como mediador do processo.

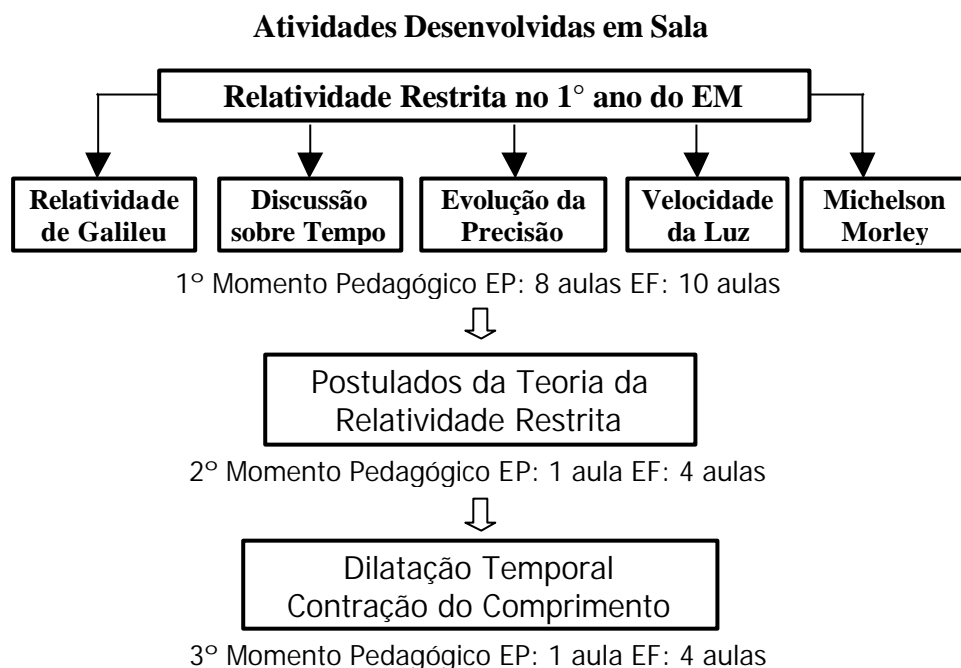
No terceiro momento pedagógico, retoma-se o problema proposto inicialmente, para sua reinterpretção à luz do conhecimento científico sistematizado no momento anterior. Além disso, outras situações são propostas, algumas até extrapolando o cotidiano dos alunos, para que os mesmos utilizem e reconheçam 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.

A resposta aos desafios propostos não só modifica a realidade em que o sujeito está inserido, como também o próprio agente, de modo progressivo e diferenciado. Segundo a percepção piagetiana de aprendizagem, 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, reestruturando-os. 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. 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. Num modelo que conceba a coexistência de *diferentes formas de organização do concreto a partir de diferentes sistemas de abstrações mediadoras* (TERRAZZAN, 1994, p. 135) num mesmo nível, a metacognição privilegia a ativação e a recuperação de conteúdos e significados, de forma autônoma e consistente.

3. A SEQÜÊNCIA DIDÁTICA: IMPLEMENTAÇÃO DOS MOMENTOS PEDAGÓGICOS

Desde o início da concepção da proposta, nossa preocupação foi a de tornar os conceitos

da relatividade significativos para os alunos. Para isso, elencamos os seguintes temas a serem abordados inicialmente: Relatividade de Galileu, Tempo, Finitude e Magnitude da Velocidade da Luz, Evidências Experimentais Conflitantes e Contextualização Histórica. Este conjunto caracterizou o primeiro momento pedagógico de nossa seqüência didática, fundamentado nas premissas apresentadas anteriormente. A sistematização do conhecimento foi implementada com o apoio de animações e discussões envolvendo experimentos pensados e evidências experimentais. Utilizamos duas conseqüências dos postulados e retomamos as experiências conflitantes como aplicação do conhecimento (terceiro momento pedagógico). Realizamos um estudo exploratório em uma turma de primeiro ano de uma escola particular de Florianópolis, o qual foi fundamental para analisar a pertinência de estratégias e metodologias didáticas, bem como avaliar o tempo necessário para cada momento pedagógico. No Quadro 1, sistetizamos as atividades desenvolvidas.



Quadro 1. Distribuição das atividades para cada momento pedagógico. EP e EF correspondem à intervenção piloto e final, respectivamente.

4. EPISÓDIOS DE ENSINO: RESULTADOS OBTIDOS

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. Ainda na implementação do primeiro momento pedagógico, buscamos demarcar e ampliar as zonas existentes do perfil conceitual de tempo dos estudantes. Destinamos quatro aulas para este fim, abordando as perspectivas epistemológicas e ontológicas para o conceito. A análise dos resultados obtidos pela aplicação dos pré e pós-testes, assim como de episódios de ensino específicos são apresentados em outro trabalho (KARAM, COIMBRA E SOUZA CRUZ, 2006).

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 1 – Experiência de Hafele-Keating

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?*

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 um 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 provoca 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. 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. Neste episódio, o professor apresenta 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.

Os efeitos relativísticos ficam mais evidentes para velocidades próximas à da luz. Assim, são fundamentais a abordagem da finitude da luz e o reconhecimento de sua magnitude quando comparada com velocidades cotidianas. Destinamos duas aulas para esse fim, expondo algumas experiências realizadas para medir c . No segundo episódio descrito, apresentamos um debate, mediado pelo professor, sobre a finitude da velocidade da luz.

Episódio 2 – Finitude da velocidade da luz

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 explicita sua noção de incerteza no futuro e o segundo demonstrou uma falta de interesse na discussão. A resposta de A2 conduziu a discussão para a questão da velocidade da luz, evidenciando a posição social deste aluno perante a sala. 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 e que o mesmo já utiliza as unidades trabalhadas para explicar outros fenômenos. A10 demonstra conhecer o valor da velocidade de propagação da luz.

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. 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 terceiro episódio, transcrevemos o momento inicial da abordagem do segundo postulado e observamos o posicionamento dos estudantes.

Episódio 3 – Introdução ao segundo postulado

Legenda: P – o autor e professor

An – alunos

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 aviãozinho 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 vindo 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.

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. 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.

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

Episódio 4 – Análise numérica e paradoxo dos gêmeos

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: *Isso*

P: *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!*

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?*

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, condescendendo 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.

5. CONCLUSÕES

Em nossa pesquisa, analisamos a pertinência de algumas estratégias didáticas para a inserção 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. Baseamos na idéia de que as teorias modernas devem ser pulverizadas ao longo dos conteúdos clássicos, buscamos identificar temas geradores adequados para a abordagem de conceitos da teoria de relatividade restrita juntamente com os conteúdos classicamente trabalhados no início do Ensino Médio. Entretanto, vislumbramos a possibilidade de se abordar outros temas relativísticos ao longo do primeiro ano do ensino médio. 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. 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. 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. No segundo e terceiro anos existem também inúmeras possibilidades de se integrar temas relativísticos ao conteúdo clássico normalmente trabalhado. Porém, 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 Terrazan (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, 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.

6. REFERÊNCIAS

- 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.
- ARRUDA, S. M. **Mudança Conceitual na Teoria da Relatividade Especial**. 1994 Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências – Modalidade Física). Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.
- BOLZAN, D. **Formação de Professores – compartilhando e reconstruindo conhecimentos**. Porto Alegre: Mediação, 2002.
- DALY, L. N. e 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.

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.

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.

HOLTON, G. Einstein and the Crucial Experiment. **American Journal of Physics**, v. 37, n. 10, p. 968-982, 1969.

KARAM, R. A. S. **Relatividade Restrita no Início do Ensino Médio: Elaboração e Análise de uma Proposta** 2005 Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Universidade Federal de Santa Catarina.

KARAM, R. A. S.; COIMBRA, D. e SOUZA CRUZ, S. M. S. C. Tempo Relativístico no início do Ensino Médio, submetido à **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2006.

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.

MIZUKAMI, M. G. N. **Ensino: as abordagens do processo**. Temas Básicos de Educação e Ensino. São Paulo: E.P.U., 1986.

MORTIMER, E. F. 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.ifurgs.br/public/ensino/N1/2artigo.htm>. Acesso em 16 de fevereiro de 2006.

MORTIMER, E. F. ; CARVALHO, A. M. P. Referenciais teóricos para análise do processo de ensino de ciências. **Cadernos de Pesquisa da Fundação Carlos Chagas**, São Paulo, v. 96, p. 5-14, 1996.

MULLER, R. Ether Wind and the Global Positioning System. **Physics Teacher**, v. 38, n. 4, p. 243-246, 2000.

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**. 1998 Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RODRIGUES, C. D. O. **Inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio: Uma nova proposta**. 2001 Dissertação (Mestrado em Educação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROSSER, W. G. V. Recent changes in the teaching of special relativity. **Physics Education**, v. 22, n. 4, p. 213-216, 1979.

RYDER, L. H. From Newton to Einstein. **Physics Education**, v. 22, n. 6, p. 342, 1987.

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.

STANNARD, R. **O Tempo e o Espaço do tio Alberto**. Trad. A. M. Nunes dos Santos e Christopher Aurette. Lisboa: Edições 70, 1989.

TERRAZZAN, E. A. **Perspectivas para a inserção de física moderna na Escola Média**. Tese 1994 (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.

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.

VILLANI, A. e ARRUDA, S. Special Theory of Relativity, Conceptual Change and History of Science. **Science & Education** v. 7, p. 85 – 100, 1998.