

A CONSTRUÇÃO DE UM PERFIL PARA O CONCEITO DE REFERENCIAL EM FÍSICA E OS OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS A APRENDIZAGEM DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA¹

(Building a conceptual profile for the conception of reference frame in physics and the epistemological obstacles to the learning of Special Theory of Relativity)

Álvaro Leonardi Ayala Filho [ayalafilho@gmail.com]

Departamento de Física, Instituto de Física e Matemática UFPel – Caixa postal 354, Campus Universitário, CEP 96010-900, Pelotas, RS.

Resumo

Neste trabalho, utilizamos a noção de Perfil Conceitual como instrumento teórico para investigar a aprendizagem da Teoria da Relatividade Restrita e os obstáculos epistemológicos à sua compreensão. Em particular, estabelecemos o perfil conceitual da noção de referencial, considerando que esta noção é epistemologicamente e ontologicamente diferenciada quando a examinamos na perspectiva do senso comum, da Física Newtoniana e da Teoria da Relatividade Restrita. Considerando os nossos resultados e os da bibliografia examinada, argumentamos que os obstáculos epistemológicos ao entendimento da TRR podem ser relacionados a estas três regiões do perfil, especialmente quando os seus aspectos ontológicos e metafísicos são levados em conta. Argumentamos também que estes obstáculos têm duas origens principais. A primeira está associada à tentativa de ancorar os conceitos da TRR à subsunsores pertencentes a regiões não adequadas do perfil conceitual de referencial. A segunda está associada às formas de espontâneas de raciocínio, que são utilizadas para realizar esta ancoragem. Concluimos que a aprendizagem da Teoria da Relatividade Restrita deve se dar a partir da criação da região relativística do perfil conceitual de referencial e que a não construção desta região propicia o surgimento de obstáculos epistemológicos à compreensão da Teoria da Relatividade Restrita

Palavras-chave: perfil conceitual; obstáculo epistemológico; aprendizagem da Teoria da Relatividade Restrita.

Abstract

In this work, we use the notion of Conceptual Profile as a theoretical tool to investigate the learning of the Special Theory of Relativity (STR) and the epistemological obstacles to its understanding. In particular, we set the Conceptual Profile of the notion of reference frame, taking into account the fact that this notion can be ontologically and epistemologically differentiated when is described from the point of view of the Common Sense, from the point of view of the Newtonian Physics and from the point of view of the STR. Taking into account the literature results and our own findings, we claim that the detected epistemological obstacles to the STR understanding can be connect to each of these three regions, specially when the ontological and metaphysical aspects of each region are taken into account. We claim also that the epistemological obstacles have two sources. The first one emerges from the attempt to link STR concepts to subsumer belonging to a Conceptual Profile region that not corresponds to this theory. The second origin is the attempt to use of “spontaneous ways of thinking” in order to make this kind of link. We conclude that the successful learning of the STR should be related to the corresponding successful development of the relativistic region of the reference frame conceptual profile and the limited development of this region is the most important epistemological obstacle to the understanding the STR.

Keywords: Conceptual profile; epistemological obstacle; learning Special Theory of Relativity.

¹ Uma versão preliminar deste trabalho foi apresentada em Ayala Filho & Frezza (2007).

Introdução

O advento da Teoria da Relatividade Restrita (TRR) (Einstein, 2001a, 2001b) caracterizou-se por uma revolução científica bem demarcada tanto do ponto de vista histórico como epistemológico. Esta revolução provocou uma ruptura nos esquemas conceituais utilizados em Física. As relações entre as categorias básicas da Mecânica Newtoniana (MN), como espaço, tempo, energia, massa, momento e força, foram de tal forma modificadas que os próprios conceitos tiveram seus significados redefinidos. Os novos conceitos daí gerados, apesar de guardarem os mesmos nomes, são logicamente incompatíveis com a sua versão original. A TRR e a MN são teorias que, na linguagem de Thomas Kuhn (Kuhn, 2003a, 2003b), possuem conceitos localmente incomensuráveis. A incomensurabilidade significa não só que as leis físicas associadas às duas teorias são diferentes e logicamente incompatíveis entre si, mas também que toda a perspectiva do seu objeto de estudo é diferenciada e que a própria concepção do que é o conhecimento é diferenciada. Em outras palavras, diz-se que as duas teorias são ontologicamente² e epistemologicamente diferenciadas e que a TRR e a MN não podem ser logicamente reduzidas uma a outra.

Esta origem revolucionária característica da TRR e de outras teorias, como, por exemplo, a Mecânica Quântica, propõe um desafio quando nos debruçamos sobre o seu processo de aprendizagem (Ostermann, 2000). Moreira (2003), ao apresentar a Teoria da Aprendizagem Significativa, de Ausubel, afirma que, para que o material a ser aprendido seja potencialmente significativo, é necessário que o conteúdo a ser aprendido seja logicamente significativo e possa ser relacionado (associado) com os conceitos subsunsores específicos presentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Isto pressupõe que haja uma relação lógica entre os conceitos subsunsores e os novos conceitos a serem aprendidos. Desta forma, a incomensurabilidade entre a MN e a TRR desfavorece a aprendizagem significativa da segunda por um aprendiz que supostamente domine a primeira, pois a estrutura cognitiva deste terá dificuldade de ancorar conceitos da nova física. Assim, supomos que a compreensão do processo de aprendizagem da TRR e de seus obstáculos epistemológicos possa dar indícios de como a estrutura cognitiva de um aprendiz se transforma para viabilizar a aprendizagem significativa da nova teoria.

Neste trabalho, propomos a utilização da noção de Perfil Conceitual como referencial teórico para compreensão do processo de aprendizagem de uma nova teoria científica. Esta concepção foi desenvolvida por Mortimer (2000) em resposta a evidência de que a aprendizagem científica se dá a partir do desenvolvimento e aquisição dos novos conceitos científicos sem que os conceitos não científicos, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz, sejam eliminados. O perfil de um determinado conceito está composto de diferentes regiões, que correspondem a formas diferentes de “ver, representar e significar o mundo” (Coutinho, Mortimer e El-Hani, 2007, p.1). Estas regiões do perfil são ontologicamente e epistemologicamente diferenciadas e podem ser utilizadas alternadamente pelo sujeito em diferentes contextos. O processo de aprendizagem de um determinado conceito, ligado a uma nova teoria, corresponde ao desenvolvimento de uma nova região do perfil do conceito estudado. Para melhor entender o processo de aprendizagem da TRR e os seus obstáculos epistemológicos (Bachelard, 1996), propomos examinar o perfil conceitual de sistema de referência. Procuramos determinar as regiões do perfil a partir dos resultados da literatura, do desenvolvimento histórico do conceito e dos nossos próprios resultados de pesquisa. Também procuramos descrever as dificuldades de aprendizagem da TRR em termos da dificuldade

² Consideramos como “ontológicos” aqueles conceitos que definem o quadro geral mais amplo onde se inclui o recorte do mundo que pretendemos estudar. Quando estes conceitos não são associados a grandezas empíricas, mas sim são conceitos pressupostos para o entendimento de qualquer situação empírica possível, então também são ditos “metafísicos”. Como veremos, este é o caso dos conceitos de tempo e espaço absolutos na Física Newtoniana.

de desenvolver uma nova região do perfil de referencial e da tentativa de utilizar as regiões pré-existent para ancorar os novos conceitos.

Este trabalho está organizado como segue. Na próxima seção, apresentamos a noção de Perfil Conceitual e os seus principais aspectos conceituais. Na sequência, propomos o perfil conceitual de referencial, discutindo as características de suas regiões nos seus aspectos ontológicos e metafísicos. Na seção seguinte, revisamos as concepções alternativas na TRR a partir dos resultados presentes na literatura e dos resultados da nossa própria pesquisa. A seguir, procuramos descrever os obstáculos epistemológicos à compreensão da TRR no referencial teórico definido pelo Perfil Conceitual de referencial. Na última seção, apresentamos, a guisa de conclusão, os aspectos gerais de uma proposta de ensino que vise ultrapassar os obstáculos epistemológicos como compreendidos neste referencial teórico.

A noção de Perfil Conceitual

A noção de Perfil Conceitual foi proposta por Mortimer (1996) para descrever evolução conceitual em sala de aula e como um novo referencial teórico para a elaboração de estratégias para construção do conhecimento. Este modelo pretende dar conta da evidência de que a aprendizagem de uma teoria científica, que seja logicamente incompatível com os conceitos pré-existent na estrutura cognitiva do aprendiz, não substitui nem subsume estes conceitos, como proposto originalmente no Modelo de Mudança Conceitual de Posner e colaboradores ((Hewson, 1981, 1982, Posner et al., 1982, Strick & Posner, 1982, Arruda e Villani (1994)).

No âmbito da Física, esta evidência é sustentada, por exemplo, pelos resultados obtidos por Villani & Pacca (1987) na investigação das argumentações desenvolvidas por alunos para descrever a conservação de momento em colisões de vários corpos ou descrever as propriedades de propagação da luz em referenciais onde a fonte possui movimentos distintos. Os autores afirmam que, quando o uso de equações torna-se mais complexo e é exigida uma argumentação embasada na articulação dos conceitos fundamentais da teoria, o número de respostas em acordo com os padrões do conhecimento científico, seja newtoniano, seja relativístico, diminui. Segundo estes autores, os alunos parecem incapazes de “construir uma ponte entre a abstração da teoria e a complexidade da situação real, a qual invoca critérios qualitativos e pessoais”. Além disto, nesta situação, os alunos tendem a dar respostas cujo conteúdo é bastante similar às respostas dadas por alunos de um nível de escolaridade menor, o que indica que seus argumentos estão embasados em conceitos não científicos e que fazem parte de um conjunto de conhecimentos ou crenças pré-existente ao processo de instrução científica.

Outro resultado obtido por Villani & Pacca (1987) foi a detecção da existência de dois conjuntos articulados de idéias qualitativamente diferenciadas na estrutura cognitiva dos estudantes. Um conjunto relacionado às concepções ou idéias científicas e outro relacionado às concepções de senso comum. A dinâmica da evolução conceitual se daria pelo crescimento lento do campo de aplicação dos conhecimentos científicos, deixando intocadas as regiões do senso comum. Os autores concluem ainda que o equilíbrio entre o uso destas duas regiões varia com o tempo e que os estudantes não conseguem discernir os limites de aplicabilidade das concepções de senso comum. Além disto, fica claro, para os autores, que não existe tendência à mudança conceitual, mudança esta que envolveria a reinterpretação dos conceitos do senso comum em termos dos conceitos científicos (Villani & Pacca, 1987, p. 595).

Inicialmente, Mortimer (1995) retomou a noção de Perfil Epistemológico de Bachelard (1984). Esta noção considera que um determinado conceito presente na mente de um sujeito cognoscente não poder ser completamente compreendido a partir de um único sistema epistemológico. O exemplo clássico de Bachelard se refere ao conceito de massa, que aceita, do

ponto de vista epistemológico, diferentes significações em diferentes contextos, definindo um perfil com diferentes regiões. Bachelard descreve seu próprio perfil relativo ao conceito de massa em cinco regiões distintas: a região do senso comum, associada ao uso diário do conceito em termos de grandes quantidades ou volume; a região positivista, associada a noção empírica de massa, originária do uso diário da balança em medidas de massa no laboratório; a região Newtoniana, que descreve a massa como a razão matemática entre força e aceleração; a região relativística, onde a massa passa a ser dependente da velocidade e uma medida da energia de um corpo; e a região quântica, onde a massa perde já seu caráter corpuscular estrito, característica das outras regiões do perfil. As diferentes regiões do perfil são epistemologicamente diferenciadas e independentes.

Retomando a noção de Perfil Epistemológico e procurando utiliza-la para descrever a evolução conceitual em sala de aula, Mortimer (1996, 2000) considera que cada região do perfil não é apenas epistemologicamente diferenciada, mas também ontologicamente diferenciada, ou seja, corresponde a uma visão de mundo, uma perspectiva de universo completamente diferente. A inclusão de uma dimensão ontológica cumpre um papel fundamental na construção da noção de Perfil Conceitual a partir da noção de perfil epistemológico. Esta inclusão identifica o fato de que cada região do perfil de um conceito está associada a uma forma diferenciada de representar e significar o mundo. O conceito tratado, em cada uma de suas zonas, pertence a uma rede de significados diferenciada, tendo um sentido diferente em cada região.

Mortimer (2000) desenvolve a noção de perfil conceitual a partir da análise da construção dos conceitos de átomo e da estrutura da matéria. O autor analisa os modelos criados por alunos da oitava série do ensino fundamental para descrever processos de dilatação dos gases e transformação dos estados físicos da matéria. Analisando estes modelos, são propostas três regiões diferenciadas para o perfil conceitual de átomo. A primeira região é aquela associada à perspectiva ontológica que nega a possibilidade do vazio e, assim, do próprio conceito de átomo. Esta concepção ontológica está associada a uma “epistemologia sensorialista”, pois nesta “concepção de matéria há um conceito sensorialista de estado físico intimamente ligado às aparências externas e aspectos sensoriais dos materiais”(Mortimer, 2000, p.128). A negação ontológica do vazio está associada à percepção sensorial de que os objetos materiais são contínuos.

A segunda região do perfil é aquela chamada de atomismo substancialista, onde “apesar de estarem usando [a noção de] partículas, os estudantes pensam tais partículas como grãos de matéria que podem dilatar-se, contrair-se, mudar de estado, etc.” (Mortimer, 2000, p.129). No substancialismo, os grãos de matéria guardam as mesmas propriedades da matéria macroscópica. No entanto, os alunos já admitem a existência do vácuo entre as partículas, mudando sua perspectiva ontológica. A esta região está associada uma epistemologia realista. A terceira região do perfil é aquela associada à química “clássica”, onde o átomo é “a unidade básica na constituição da matéria” (Mortimer, 2000, p.133) e conserva sua unidade fundamental nas reações químicas. As próprias reações são descritas como recombinações microscópicas dos átomos.

Na perspectiva da noção de Perfil Conceitual, a evolução conceitual em sala de aula não se dá pela mudança conceitual, onde a teoria antiga é abandonada em nome de uma teoria nova, mais inteligível, plausível e promissora que a primeira. A evolução conceitual se dá pela mudança do perfil conceitual, onde a teoria antiga não é esquecida ou subsumida pela nova na estrutura cognitiva do aprendiz, mas a nova teoria é incorporada, criando uma nova região no perfil conceitual, com as suas dimensões epistemológicas, ontológicas e metafísicas. O processo de criação da nova região corresponde a uma mudança no perfil e deve vir acompanhado da tomada de consciência do aluno sobre seu próprio perfil e pela diferenciação progressiva das regiões (Mortimer, 1995). Este processo deve facilitar o uso adequado destas regiões de acordo com a necessidade de articulação dos conceitos.

A investigação das regiões do perfil conceitual de referencial

A investigação de perfis de diversos conceitos está descrita na literatura. Por exemplo, Amaral e Mortimer (2001) investigaram o perfil do conceito de calor em Química, Santos e Domènech (2005) examinaram o conceito de massa em Física, Coutinho, Mortimer e El-Hani (2007) examinaram o perfil conceitual de vida em Biologia e Nicolli e Mortimer (2009), o perfil conceitual de morte. Nestes trabalhos, é investigado o perfil de um conceito apresentado por um grupo delimitado num determinado contexto específico, seguindo a metodologia discutida em Mortimer, Sciott e El-Hani (2009). De outra forma, nosso objetivo, neste trabalho, é mostrar que as concepções alternativas em TRR podem ser descritas a partir da noção de perfil conceitual de referencial e que esta descrição permite um entendimento amplo dos obstáculos epistemológicos à compreensão desta teoria. Assim, nossa metodologia constituiu-se em uma revisão das concepções alternativas em cinemática newtoniana e relativística. Estabelecemos as regiões do perfil conceitual de referencial a partir de resultados apresentados na literatura, da própria evolução histórica da noção de referencial e dos resultados da nossa pesquisa exploratória. Consideramos que três regiões são suficientes para descrever este perfil: a região do senso comum, a região da Física Newtoniana e a região relativística. Nosso interesse na noção de sistema de referência tem origem na dificuldade apresentada pelos alunos de descrever, para um par de eventos, os efeitos de dilatação do tempo, contração da distância e a relatividade da simultaneidade do ponto de vista de observadores em diferentes referenciais. Apesar de resolverem os respectivos problemas analíticos e numéricos com facilidade, os alunos tendem a apresentar dificuldade de desenvolver uma análise conceitual do problema quando solicitados. A análise destas dificuldades será objeto de estudo na próxima seção.

A ideia de que os estudantes se utilizam de diferentes conjuntos de conceitos, ou “modelos”, para organizar suas concepções referentes à TRR já foi proposta na literatura. Villani e Pacca (1987), ao estudar concepções espontâneas de estudantes sobre a velocidade da luz, classificaram em três categorias as formas de raciocínio e argumentação e as respostas dadas aos testes de concepções alternativas: aquelas que estão de acordo com a perspectiva relativística, aquelas que estão de acordo com a perspectiva da Relatividade Galileana e aquelas que são orientadas por concepções do senso comum. Neste trabalho, retomamos esta divisão, mas tratamos cada uma das divisões como regiões de um perfil conceitual, onde os aspectos ontológicos e epistemológicos são explicitados e considerados fundamentais na diferenciação das regiões.

Na discussão realizada a seguir, apresentamos inicialmente as regiões newtonianas e relativísticas e, posteriormente, discutiremos as características da região do senso comum. Tomaremos esta ordem porque o exame da região do senso comum se dá a partir da coleta de diversos estudos sobre concepções alternativas em cinemática clássica e relativística, que serão interpretadas tendo como referência as noções de movimento e referencial da Mecânica Newtoniana e da Mecânica Relativística. Consideramos conveniente então explicitarmos inicialmente as visões cientificamente aceitas e, após, discutirmos as concepções alternativas.

A noção de referencial segundo a Mecânica Newtoniana.

As noções básicas da Mecânica Newtoniana foram apresentadas por Newton no capítulo inicial de definições do “Principia” (Newton, 2002). Neste capítulo, Newton apresenta as noções ontológicas básicas da Mecânica, que são tempo, espaço, lugar, movimento e massa, sem utilizar explicitamente o termo “referencial”. No entanto, este termo emerge naturalmente quando interpretamos o texto de Newton com a nossa linguagem contemporânea.

Existe, na Física Newtoniana, uma diferenciação metafísica entre os conceitos absolutos e relativos. Por exemplo, o tempo absoluto é definido como

“verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração”,

que é distinto daquele que medimos nos relógios ou através de qualquer outro movimento periódico, pois (Newton, 2002, p.45):

“o tempo comum aparente e relativo é uma medida de duração perceptível e externa...que é obtida por meio do movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano.”

Note-se que existe aqui uma distinção metafísica entre o tempo absoluto e relativo. Esta distinção é dita metafísica, porque toda tentativa de medir o tempo recorrerá, inevitavelmente, a alguma forma de movimento. Assim, o tempo absoluto não poderá ser medido e pode ser tomado como uma grandeza que está para além da nossa experiência sensível. Newton admite que (Newton, 2002, p.46):

“Pode ser que não haja algo como o movimento uniforme, por meio do qual o tempo [absoluto] possa ser rigorosamente medido. Todos os movimentos podem ser acelerados ou retardados, mas o fluxo do tempo absoluto não é passível de mudança.”

A mesma distinção metafísica é feita por Newton com relação ao espaço absoluto e relativo (Newton, 2002, p.45):

“O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. O espaço relativo é alguma dimensão ou medida móvel dos espaços absolutos, a qual nossos sentidos determinam por sua posição em relação aos corpos...”

Newton dá atenção ainda aos conceitos de lugar relativo e absoluto e de movimento relativo e absoluto:

“o movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro; e o movimento relativo, a translação de um lugar relativo para outro.”

Da leitura do “Principia”, podemos interpretar que Newton nutre a esperança de determinar o movimento absoluto, quando afirma que (Newton, 2002, p.47)

“É possível que nas regiões remotas das estrelas fixas, ou talvez além delas, possa haver algum corpo em repouso absoluto”,

mas admite que

“como é impossível saber, a partir das posições dos corpos uns em relação aos outros nas nossas regiões, se qualquer deles mantém a mesma posição em relação aquele corpo remoto, conclui-se que o repouso absoluto não pode ser determinado a partir da posição dos corpos na nossa região.”

Mesmo admitindo a existência de um corpo em repouso absoluto, o movimento absoluto não poderia ser determinado, pois, na concepção mecânica, movimento significa mudança de posição em um intervalo de tempo e nós só somos capazes de medir o tempo relativo. Assim, estamos apartados, do ponto de vista metafísico, do movimento absoluto. Newton inclui ainda, na sua argumentação sobre as limitações da determinação do movimento absoluto, o papel exercido pela composição de movimentos. Segundo Newton

“É uma propriedade do movimento que as partes, as quais guardam determinadas posições em relação a seus todos, realmente compartilhem o movimento desses todos.[...] e o ímpeto dos corpos que se movem para a frente origina-se do ímpeto conjunto de todas as partes. Logo, se corpos vizinhos são movidos, aqueles que estão em repouso relativo entre eles compartilharão seu movimento.”

E, mais adiante, afirma,

“Por esta razão, o movimento verdadeiro e absoluto de um corpo não pode ser determinado por sua translação a partir daqueles que apenas parecem estar em repouso; pois os corpos externos não apenas devem aparentar estar em repouso, mas estar realmente em repouso.”

No esforço de diferenciar os movimentos relativos e absolutos, Newton introduz explicitamente a consideração sobre a composição de movimentos. O movimento de um grupo de corpos, cada um sendo parte de um todo, compartilham o movimento do todo em relação a um corpo externo. Além disto, o movimento do conjunto não pode ser percebido por qualquer uma das partes, a menos que esta parte tome como referência um corpo externo ao conjunto. Por outro lado, o movimento de uma das partes em relação ao corpo externo é a composição do movimento da parte em relação ao todo com o movimento do todo em relação ao corpo externo. Desta forma, o movimento passa a ser tratado como um “estado de movimento” e o corpo é indiferente ao seu próprio estado de movimento, pois este estado depende do corpo externo a ser tomado como referência.

Uma outra noção, de dimensão ontológica e metafísica, é a identificação do espaço físico com o espaço abstrato da Geometria Euclidiana. Esta identificação inclui as propriedades de isotropia (igual em todas as direções) e homogeneidade (igual em todos os pontos) do espaço geométrico e se contrapõe as noções de espaço da Física Aristotélica e Medieval. Esta identificação, que já estava contida na obra de Galileu, não é explicitamente formulada por Newton, mas, como mostrou Koyré (1986) é condição necessária para a formulação do Princípio de Inércia. O ulterior desenvolvimento da Geometria Analítica, a partir de Descartes (Alquié et al., 1887), permitiu que o movimento não fosse mais tomado em relação a um corpo, mas sim em relação a um sistema mais abstrato de eixos ordenados infinitos, surgindo assim a noção de sistema de referência ou referencial.

Interpretando as considerações acima a partir da perspectiva teórica definida pela noção de Perfil Conceitual, afirmamos que os conceitos de espaço, tempo, lugar, movimento e matéria, a sua diferenciação metafísica entre absoluto e relativo, assim como as propriedades de composição de movimentos e a geometrização do espaço, com a sua identificação com os eixos coordenados cartesianos, compõem o conjunto de conceitos ontológicos que definem a noção abstrata de referencial na Física Newtoniana. A existência do espaço e do tempo absolutos e metafísicos garante, por princípio, a possibilidade de uma medida universal destas grandezas, mesmo que estas medidas sejam sempre relativas. Afirmamos que o significado da noção de referencial deve ser construído a partir da articulação de todos estes conceitos, não podendo ser caracterizado apenas com um conjunto de eixos cartesianos. Nesta perspectiva, defendemos que a noção de referencial deve ser tratada como uma ontodefinição, na forma estabelecida por Videira (2005). Além disto, o desenvolvimento, por um aprendiz, destes conceitos ontológicos que compõe a noção de referencial é condição necessária para que se estabeleça a aprendizagem significativa da Mecânica Newtoniana. A desconsideração destas noções ontológicas pela tradição de ensino embasada na perspectiva empirista-indutivista (Silveira e Peduzzi, 2006) é, a nosso ver, uma das sérias limitações impostas à compreensão significativa da Mecânica Newtoniana.

A noção de referencial segundo a TRR.

O surgimento da TRR trouxe uma alteração na noção de referencial que representa uma ruptura, tanto ontológica como epistemológica, com a respectiva noção newtoniana, criando uma nova região no perfil conceitual. Os postulados da teoria afirmam que (i) as leis da Física são as mesmas em qualquer sistema de referência e (ii) a velocidade da luz, em qualquer sistema de referência, é igual a uma constante C . O segundo postulado implica ser a velocidade da luz independente da velocidade da fonte. A satisfação destes postulados se dá em detrimento da possibilidade de estabelecer um parâmetro único de tempo para referenciais com movimento relativo. Nesta região do perfil, um referencial é ainda representado por eixos cartesianos infinitos que se comportam como réguas rígidas. No entanto, a cada ponto do referencial está associado um observador com um relógio e o fato de que as informações se propagam com velocidade finita impõe que estes observadores estabeleçam um procedimento operacional para garantir a sincronização de seus relógios, ou seja, um procedimento que garanta uma escala única de tempo para o referencial. Todos os observadores em repouso relativo e que possuam uma escala de tempo comum fazem parte do mesmo sistema de referência. A diferenciação dos referenciais se dá pela velocidade relativa dos mesmos.

É importante ressaltar a centralidade do conceito de evento na TRR. Um evento é qualquer ocorrência a qual podemos associar uma posição no espaço e um instante de tempo bem definido. Este instante é definido pelo relógio localizado na posição onde ocorre o evento. Por conveniência, associamos sempre um pulso de luz ao evento, emitido no instante de tempo e no ponto do referencial onde este ocorre. É suposto também que um observador distante é capaz de determinar o tempo de ocorrência do evento considerando a correção associada ao tempo de viagem do sinal emitido pelo mesmo.

As características discutidas acima invertem a posição ontológica dos conceitos de espaço, tempo e movimento. Na TRR, o conceito de evento e de sistema de referência, como definidos acima, passam a ter uma posição ontológica central na formulação da teoria. O tempo próprio é definido como intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem no mesmo ponto do espaço. O comprimento é definido como a separação espacial de dois eventos simultâneos. O ordenamento temporal entre dois eventos (e, por consequência, sua possível simultaneidade) é definido pela ordem temporal do registro da chegada dos pulsos de luz em um observador equidistante aos eventos. Além disto, será impossível estabelecer uma escala de tempo única para observadores em diferentes referencias. Os conceitos de tempo, espaço e movimento perdem sua posição ontológica central em favor do conceito de evento. As grandezas físicas são definidas em relação a um referencial, mas os conceitos de espaço absoluto, tempo absoluto e, por consequência, de referencial absoluto deixam de ter significado Físico. Observadores, em diferentes referencias, ao observarem dois eventos, não irão concordar, necessariamente, quanto ao valor do intervalo de tempo entre estes dois eventos, quanto a medida do comprimento que separa os dois eventos e quanto ao ordenamento temporal dos eventos.

No contexto ontológico da TRR, o entendimento completo de uma situação física composta de um ou mais eventos só é possível a partir da reunião dos registros de todos os observadores de um referencial. Se estes observadores tiverem eixos cartesianos comuns e se tiverem uma escala única de tempo determinada, ou seja, se tiverem seus relógios sincronizados, então estes observadores devem concordar sobre os valores da separação espacial e temporal de eventos. Os observadores de um segundo conjunto, que estejam em movimento em relação ao primeiro conjunto, também concordarão entre si quanto às medidas do intervalo temporal e espacial dos eventos, mas não concordarão com os achados do primeiro conjunto. Assim a compreensão final da situação física que se apresentou só é possível após um tempo suficientemente longo e a partir de uma “conferência entre observadores” em repouso em relação a um mesmo referencial. Esta

descrição será diferente para referencias diferentes. O sujeito cognocente não é autorizado a assumir o papel de um “meta-observador” que possa ter uma consciência instantânea da situação física em desenvolvimento, independente de referencial.

A região do “senso comum” do perfil conceitual de referencial.

A região do perfil conceitual de referencial associada ao senso comum pode ser descrita a partir das concepções alternativas de referencial apresentadas por estudantes. Para caracterizar esta região do perfil, reunimos resultados da literatura e os nossos próprios resultados de investigação. Inicialmente, salientamos que todo o processo de investigação de concepções alternativas está associado a um processo hermenêutico, onde as respostas dos estudantes são interpretadas em uma perspectiva conceitual que consideramos como cientificamente aceita. Na investigação das concepções alternativas, a própria elaboração das questões e a interpretação das respostas dadas são processos cujo significado é construído dentro de um contexto teórico que, como já vimos, possui suas dimensões ontológicas e epistemológicas. Diferentes aspectos das concepções alternativas de referencial são explicitados quando tomamos como referência teórica a Relatividade Galileana ou quando tomamos como referencial teórico a TRR. A região do “senso comum” do perfil conceitual de referencial deve ser construída a partir da composição destes diferentes aspectos.

Examinamos inicialmente as noções alternativas de referencial obtidas na perspectiva teórica da Relatividade Galileana. As concepções alternativas de referencial estão vinculadas, necessariamente, as concepções alternativas de movimento. No trabalho clássico de Satiel e Malgrange (1980) (SM), são examinadas as formas espontâneas de argumentação em torno da cinemática elementar. Os autores afirmam que esta argumentação se dá a partir de um “modelo natural” que não é simplesmente uma distorção do conhecimento escolar, mas sim um modelo estruturado em duas componentes que se articulam constantemente: uma componente descritiva e outra componente causal. A componente causal associa movimento e velocidade a uma causa, não distinguindo claramente as noções de força e velocidade. Velocidade e movimento são considerados uma propriedade intrínseca do corpo que se move e são definidos com referência às forças que, segundo esta perspectiva, provocam o movimento, e não em relação a observadores e sistemas de referência. Esta componente do “modelo natural” é proposta pelos autores a partir da interpretação de respostas dadas a problemas de composição de movimentos de um barco que se move sobre a correnteza de um rio. Os autores afirmam que mesmo as respostas corretas para a trajetória de um barco têm a sua justificativa embasada em uma composição de forças e não de velocidades, como, por exemplo, a expressão “A trajetória resulta da *ação simultânea* do barco e da correnteza”. A associação entre movimento e força é proposta a partir da interpretação de respostas dadas a um problema que apresenta dois nadadores em um rio, um fixo em relação à margem e outro se movendo junto com a correnteza. Os dois observam um peixe que salta do rio com movimento paralelo a correnteza. Segundo os autores, a resposta típica afirma que (Satiel e Malgrange, 1980, p.77)

“Existe apenas uma velocidade para o peixe. Uma vez que está fora da água, o peixe não está mais submetido ao arrasto do rio. Assim, sua velocidade é a mesma para os dois observadores.”

Assim, a articulação da componente causal do modelo leva a conclusão de que, cessando a ação do arrasto do rio, o peixe não terá mais o movimento associado a este arrasto. Além disto, mesmo que um dos observadores tenha um movimento em relação ao rio, o movimento observado pelos dois deve ser o mesmo. Logo, o movimento não é definido em relação a um observador, mas sim pela relação intrínseca entre a força que causa o movimento e o corpo. A composição do movimento se dá não pela composição de velocidades, mas sim pela composição das causas ou das forças que provocam o movimento.

A outra componente do “modelo natural” é a descritiva. Esta, por sua vez, é composta de dois diferentes aspectos que também se combinam na descrição do movimento. Primeiro, a geometrização das distâncias, sem referência à dependência temporal dos movimentos e sem a necessária articulação entre composição de movimentos e adição de velocidades. Segundo os autores, “o espaço onde se dá o movimento deve ser único, independente do observador e puramente geométrico” (Satiel e Malgrange, 1980, p.77), sem referência a passagem do tempo e a uma composição de velocidades. Para acomodar esta situação com a definição de movimento como uma propriedade intrínseca do corpo e não como uma relação do corpo em movimento com o observador, surge o segundo aspecto da componente descritiva: a distinção entre as noções de movimento “real”, ou “verdadeiro”, e movimento “aparente”. O movimento “real” é aquele que deve ser descrito e explicado pela teoria física, enquanto o movimento “aparente” é considerado uma “ilusão de ótica” e não merece consideração física. Assim surge também a articulação das duas componentes do modelo: o movimento “real” é aquele que faz sentido físico. É aquele que pode ser descrito em termos da interação “força-corpo”. Os autores concluem que os estudantes raramente ou nunca fazem uso da noção de sistema de referência para estabelecer as relações cinemáticas e ainda combinam indiscriminadamente quantidades cinemáticas características de diferentes referenciais. Força e velocidade estão sempre combinadas. As características de movimento ou repouso são tomadas como “intrínsecas” a um corpo, sendo que repouso e movimento são propriedades ontologicamente diferenciadas. A noção de velocidade está muito pouco vinculada a noção de referencial, o que (Satiel e Malgrange, 1980, p.75)

“... provavelmente corresponde ao fato de que, na vida diária, um referencial particular é favorecido por razões práticas. ...A necessidade de se referir a um referencial desaparece... Assim a velocidade, no lugar de aparecer como uma propriedade de um par (corpo em movimento + referencial), naturalmente torna-se propriedade do corpo sozinho em movimento, [tornando-se] uma característica intrínseca [do corpo], entre outras.”

Outra investigação sobre concepções alternativas na Relatividade Galilenana foi realizada por Panse, Ramadas e Kumar (1994). Estes autores propuseram investigar as concepções alternativas em mecânica no contexto da Relatividade Galileana e da noção de sistema de referência. A partir de um estudo exploratório, os autores propuseram um teste de respostas livres que foi administrado a um conjunto de 50 alunos graduandos em Física que já haviam cursado uma disciplina introdutória de TRR. Para análise dos resultados, foi utilizado um procedimento que os autores chamaram de uma “estratégia holística”. Em cada resposta, foram destacadas sentenças que pudessem ser tomadas como indicações das noções de referencial que estariam sendo utilizadas pelos estudantes. Estas sentenças foram então reorganizadas em termos de noções chave que apareceriam implícita ou explicitamente. A partir destas noções chave, os autores definiriam categorias interpretativas que estariam sendo parafraseadas nas afirmações dos alunos. Assim, foram identificadas sete categorias superordenadas que caracterizavam concepções alternativas dos estudantes. Para investigar a consistência, a amplitude do uso e dependência no contexto, os autores propuseram testes de múltipla escolha específicos para cada categoria a ser examinada. Abaixo, vamos apresentar o espectro das categorias das concepções alternativas, junto com exemplos escolhidos para ilustrar os seus significados.³

1. *Sistemas de referência são tratados como objetos concretos;*
2. *Limitar a extensão do sistema de referência ao tamanho do objeto físico ao qual o sistema está fixo;*
3. *Tratar objetos pequenos localizados sobre objetos maiores como “parte do sistema de referência” do objeto maior;*
4. *Associar eventos ou fenômenos físicos específicos a referenciais específicos;*
5. *Classificar os movimentos em “reais” e “aparentes”*

³ Para maiores detalhes sobre a pesquisa, reportamos o leitor à referência citada acima.

6. *Associar a descrição física à visualização do fenômeno e*
7. *Pseudorelativismo.*

Notamos que muitos dos aspectos do “modelo natural” proposto por Satiel e Malgrange(1980) podem ser reinterpretados em termos das categorias apresentadas acima. Também as categorias ontológicas presentes na linguagem utilizada na sala de aula podem reforçar algumas destas concepções. As categorias 1. e 2. estão fortemente correlacionadas. Estas categorias podem ser reforçadas quando nos referimos, por exemplo, “ao referencial da sala de aula”. Um aluno pode considerar que ao sairmos da sala de aula estamos saindo do referencial ou que um aluno sentado no pátio da escola não faria parte do referencial. Um outro exemplo possível da utilização destas concepções alternativas seria a afirmação de que um objeto liberado por um avião cairia na Terra percorrendo uma trajetória vertical linear quando observada de um referencial “ligado” a Terra. As resposta dada a questão do peixe que salta da água discutida acima também pode ser classificada dentro das concepções 1.e 2. Tanto o peixe, ao saltar da água, como o objeto, ao ser liberado pelo avião, estariam mudando de sistema de referência, pois estariam ocupando um espaço além dos limites do sistema. Um outro achado de Malgrange e Maury (1976) corrobora esta afirmação. Segundo estes autores,

“alunos afirmam que uma bola pesada, ao ser jogada para cima por um homem que está sobre um pavimento em movimento, deve cair atrás dele porque

- *quando a bola está no ar, não há ligação física entre a bola e pavimento;*
- *a bola perde sua velocidade horizontal imediatamente;*
- *a bola deve subir e descer ao longo de uma linha vertical*

Outra manifestação destas concepções é a ideia de que dois objetos muito distantes “possuem” referenciais distintos. Por exemplo, em um problema em que uma nave espacial parte da Terra para a uma estrela, a Terra e a estrela são tratadas como “pertencentes” a referenciais distintos. A concepção 3., por exemplo, se refere ao fato de pequenos objetos, como um projétil, disparados na superfície de uma nave ou sobre uma plataforma, “pertencem” ao referencial da plataforma. A combinação da concepção 3. com as concepções 1. e 2. levam a considerações de que, por exemplo, o professor, caminhado dentro da sala de aula, “está no referencial da sala de aula”. Esta afirmativa desconsidera que este movimento poder ser descrito a partir do referencial onde a sala de aula está em repouso ou a partir do referencial onde o professor está em repouso e o que diferencia os dois referenciais é a sua velocidade relativa.

A concepção 4. caracteriza as afirmações que determinados fenômenos ocorrem em um referencial, mas não em outro. Ou fenômenos descritos em referenciais distintos são tratados como fenômenos distintos. Como mostram Scherr, Shaffer e Vokos (2002), é comum que os alunos lancem mão desta concepção quando se deparam com a contradição entre as noções de espaço e tempo absoluto e os resultados da TRR. A concepção 5. reproduz o resultado de Satiel e Malgrange (1980), mas Panse, Ramadas, Kumar (1994) não relatam que os alunos tenham utilizado a relação força-movimento para determinar qual movimento é “real”. No entanto, estes últimos relatam uma descrição da dicotomia “real-aparente” que interpretamos como tendo uma origem dinâmica. Ao descrever um movimento relativo trem-plataforma, o movimento do trem é considerado real, pois o trem é finito e o seu movimento pode ser sentido, enquanto o movimento da plataforma (ligada a Terra) não pode ser percebido, “pois a Terra é tão grande que sua velocidade é desprezível” (Panse, Ramadas e Kumar, 1994, p. 67). Este resultado pode ser interpretado em termos de uma confusão entre argumentos cinemáticos, envolvendo o conceito de velocidade relativa, e argumentos dinâmicos, envolvendo a terceira lei de Newton. A concepção 6. está associada, em varias situações, à concepção 5., já que o movimento “aparente” é descrito através da percepção visual do movimento. Este vínculo ao “ver” também aparecerá como obstáculo à compreensão da TRR. O “pseudorelativismo” surge de uma noção rudimentar de relatividade do movimento que, quando

associada à concepção 6., da origem à concepção de que a descrição visual do movimento depende do observador. Lembramos que a concepção 3. garante que o movimento “real” não depende do observador.

A consideração de um referencial para a descrição de um fenômeno físico não é espontânea. Quando os alunos são instigados a fazê-lo, emerge a concepção alternativa que os leva a considerar que um sistema de referência é uma “porção do espaço ligada a um corpo concreto, delimitado pela forma e pelo tamanho deste corpo, dentro do qual um observador ‘vê’ um determinado fenômeno” (Panse, Ramadas e Kumar, 1994, p.75). Além disto, um fenômeno “pertencente” a um determinado sistema de referência terá uma descrição diferente em outro sistema e os movimentos poderão ser tratados como “aparentes” ou “reais”, conforme o referencial tomado.

As concepções alternativas na TRR.

Estabelecidas as regiões do perfil conceitual de referencial, passamos a examinar algumas concepções alternativas na TRR que emergem nas respostas a três problemas específicos: a descrição qualitativa, a partir de distintos referenciais, dos efeitos de dilatação do tempo e contração da distância na produção e decaimento de partículas elementares (múons); a descrição da propagação de um pulso de luz a partir de um referencial onde a fonte está em repouso e a partir de referenciais onde a fonte está em movimento; e a descrição da simultaneidade de eventos a partir de distintos referenciais. O primeiro problema é parte da nossa própria investigação, enquanto que os dois últimos foram examinados por Villani e Pacca (1987) e Scherr, Shaffer e Vokos (2001), respectivamente. Nos três casos, apresentaremos o problema, um esquema de raciocínio possível para resolver o problema, tendo a noção de evento como conceito ontológico fundamental, e as concepções alternativas apresentadas pelos alunos.

Iniciamos apresentando um estudo exploratório realizado por nós em uma disciplina introdutória à TRR. Nesta disciplina, que está localizada no sétimo semestre do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Pelotas, são tratados os temas “Cinemática Relativística”, “Dinâmica Relativística” e “Relatividade e Eletromagnetismo”. Neste estágio do curso, os alunos já desenvolveram estudos avançados, em nível de graduação, de Mecânica Newtoniana, Mecânica Quântica, Termodinâmica e Eletromagnetismo. Examinamos as respostas dadas a uma questão sobre cinemática relativística por 13 alunos graduandos. Esta questão foi apresentada como um item da primeira avaliação da disciplina no primeiro semestre de 2005. A questão estava formulada assim:

“Um múon possui um tempo de vida próprio de 2 μ s. Após ser produzido por uma reação de alta energia, o múon viaja, no referencial de laboratório, uma distância de 900 metros.”

“(a) Considerando a dilatação do tempo de vida do múon no referencial de laboratório, calcule a velocidade do múon neste referencial.”

“(b) Calcule a distância percorrida pelo laboratório no referencial do múon. Explique a contradição aparente entre as distâncias medidas nos dois referenciais.”

Para responder esta questão, o aluno deve perceber que tempo e distância são dados em referenciais distintos e que a interpretação solicitada no item (b) também deve se valer das diferenças na descrição dos dois eventos (surgimento e decaimento do múon) no referencial onde o múon está em repouso e no referencial onde o laboratório está em repouso. Centramos nossa atenção nas respostas ao item (b). A resposta considerada correta deveria levar em conta que, no referencial onde o múon está em repouso, os dois eventos ocorrem no mesmo ponto do referencial, de tal forma que o tempo medido é o tempo próprio. No referencial onde o laboratório está em repouso, a produção e o decaimento do múon ocorrem em pontos distintos do referencial, o que implica a necessidade de dois observadores (dois relógios sincronizados) para determinar o tempo de vida do múon. Nestas condições, os observadores no laboratório medirão um intervalo de tempo

maior do que os observadores associados ao referencial onde o múon está em repouso. Os observadores solidários ao múon determinarão que o laboratório percorreu uma distância menor que 600 m. Dos treze alunos que realizaram a prova, dois erraram completamente a questão, três acertaram completamente e oito identificaram que a discrepância estava associada à dilatação do tempo/ contração da distância. Destes oito alunos, dois apenas afirmaram categoricamente a existência deste fenômeno e seis (46%) apresentaram uma justificativa que evidencia a dificuldade de descrever os dois eventos em referenciais distintos, como podemos exemplificar nas respostas abaixo:

“A contradição aparente é devido à discrepância entre os valores da distância percorrida pelo múon quando observado no referencial do laboratório e no referencial do múon.”

“No problema dado, a distância no referencial do múon é menor em virtude do múon estar se movendo com uma velocidade da ordem de grandeza de c .”

“Como o múon viaja com uma velocidade próxima a da luz, ele ‘vê’ as distâncias que percorre contraídas em relação ao referencial do laboratório.”

Nos exemplares acima, sublinhamos as expressões que indicam a dificuldade de distinguir a descrição dos eventos nos dois referenciais. Mesmo fazendo referência a resultados determinados pelos observadores em repouso em relação ao múon, como a contração da distância, o estudante ainda se refere ao movimento do múon. Estas respostas podem ser interpretadas considerando que na estrutura cognitiva do estudante predomina a noção de referencial absoluto. No entanto, esta não é uma noção Newtoniana, pois o referencial absoluto está associado ao próprio sujeito cognoscente. Parece estar presente não só a noção de referencial absoluto, mas sim a noção de movimento absoluto. É relevante notar ainda que nenhum dos alunos utilizou, na sua argumentação, o fato de que, no referencial onde a Terra está em repouso, são necessários dois observadores para determinar o tempo de vida do múon e, no referencial do múon, apenas um. Isto indica que a noção de referencial da TRR não foi completamente aplicada nem mesmo pelos alunos que responderam corretamente a questão.

Resultados bastante similares foram obtidos quando os alunos da turma de 2006 foram solicitados a responder a seguinte questão

“A partir de colisões de partículas de raios cósmicos ocorre a produção de múons na atmosfera a uma altura de 9000m. Considerando que estes possuem velocidade de, aproximadamente, $0,998c$ e tempo de vida igual a 2×10^{-6} , os múons poderiam deslocar-se apenas 600m e não poderiam atingir a superfície da Terra. No entanto, estes múons são detectados na superfície. Explique esta situação a partir

(a) de um referencial onde a Terra está em repouso;

(b) de um referencial onde o múon está em repouso.”

Dos treze alunos que responderam esta questão, cinco não responderam ou deram respostas indistinguíveis, três responderam corretamente e cinco apresentaram respostas que podem ser interpretadas de acordo com a noção de referencial apresentada acima. Vejamos alguns exemplos de respostas dadas:

[item (a)] No referencial da Terra, o tempo de queda do múon é dilatado, sendo que assim ele consegue percorrer a distância até a superfície.

[item (b)] No referencial do múon, a distância que ele tem que percorrer é contraída, sendo que seu tempo de vida é suficiente para que ele chegue até a superfície.

Em uma outra resposta, lemos:

[item(b)] Porém, quando o referencial é colocado no múon, seu tempo de vida próprio é cerca de 2×10^{-6} s e ele acaba deslocando-se apenas 600 m aproximadamente.

E ainda

[item(b)] Neste caso ocorre, segundo a Teoria da Relatividade Restrita, um 'encurtamento' da distância a ser percorrida pelo múon, ou seja, mesmo que o tempo em relação ao referencial adotado (múon em repouso) seja menor que o tempo em relação a Terra, a distância a ser percorrida também é menor.

Também este grupo de alunos não utiliza o argumento de que a observação de cada um dos dois eventos (produção e decaimento do múon) é realizada por dois observadores distintos e que, comparando seus relógios, estes observadores determinarão o tempo de vida do múon no referencial onde a Terra está em repouso. Consideramos este achado consistente com a interpretação de que a noção relativística de referencial não está sendo utilizada. Também podemos interpretar os resultados acima considerando que a noção de referencial utilizada está associada a um referencial absoluto que funde observador, referencial e sujeito cognocente, não sendo um “referencial absoluto” no sentido dado pela Física Newtoniana. Esta noção de referencial e movimento está muito próxima daquela evidenciada por Saltiel e Malgrange (1980), aqui reinterpretada no contexto da TRR.

Estas conclusões vão ao encontro dos resultados obtidos por Villani e Pacca (1987). Focaremos nossa atenção em uma das questões propostas pelos autores cujas respostas ilustram a dificuldade na construção do conceito relativístico de referencial. O problema explora a propagação espacial de dois fótons sobre a mesma direção, mas em sentidos opostos, quando visto por observadores de três referenciais distintos. No apêndice, apresentamos o problema explicitamente, mas com uma notação um pouco diferente daquela utilizada pelos autores.

A descrição em termos das propriedades de propagação da frente de onda da luz simplifica a compreensão do problema. Como a luz possui velocidade constante e igual em todas as direções, a luz se propaga em uma frente de onda esférica, centrada no ponto de emissão (ponto onde ocorre o evento). No sistema de referência onde a antena emissora (fonte de luz) está em repouso, a antena se mantém no centro da frente de onda. Os dois trens se deslocam em relação a este centro. O trem TB estará mais próximo do pulso B e o trem TA, do pulso A. No sistema de referência solidário ao trem TB, as antenas se movem para a esquerda, mas o centro da frente de onda não acompanha as antenas, pois a velocidade da luz é independente da velocidade da fonte. Este centro permanece sobre o trem TB e garante que os dois fótons, correspondentes aos dois pulsos, estarão sempre equidistantes a TB. O mesmo raciocínio vale quando examinamos os eventos a partir de um referencial onde o trem TA está em repouso. Note que este raciocínio torna-se simples porque acessa conceitos ontológicos básicos, como a noção de evento e de sistema de referência. Neste caso, o centro da frente de onda permanece sobre TA e o trem se mantém equidistante aos dois fótons.

Os autores classificam as respostas dos alunos em termos de três tipos de concepções: aquelas coerentes com a TRR, aquelas definidas no contexto da Relatividade Galilenana e aquelas que se enquadram melhor na noção cinemática do senso comum, no sentido estabelecido por SM. O item (a) não permite distinguir a que concepções o aluno está vinculado, pois, no referencial solidário a estação, fixo em relação à Terra, os três esquemas conceituais citados acima levariam a resposta de que os trens teriam andado uma distância $L/2$. No entanto, nos itens (b) e (c) estas diferenciações podem ser feitas, pois exigem que o aluno se coloque solidário aos observadores associados ao referencial onde o trem TB (item b) ou TA (item c) estão em repouso. No item (b), o aluno deve notar que o trem TB permanece em repouso e os dois fótons se afastam dele com velocidade constante c , enquanto o trem TA, a antena emissora e a antena receptora se movem para a esquerda. Podemos considerar que os fótons fazem parte de uma frente de onda esférica que se

propaga tendo seu centro fixo no trem TB. Quando o fóton B atinge a antena receptora, ambos os fótons estão equidistantes ao trem TB. No item (c) a resposta é similar, pois TA permanece em repouso e a frente de onda se propaga tendo como centro TA. O trem TB, a antena emissora e a antena receptora se movem para a direita. Novamente, quando o fóton B atinge a antena receptora, ambos os fótons estão equidistantes ao trem TA. Os autores submeteram este problema a 24 alunos que fazem parte de programas de pós-graduação em Física. Todos os alunos acertaram o item (a), sendo que apenas três indicaram o sistema de referência utilizado. No item (b), 4 alunos responderam corretamente ($TB-B = TB-A$) e 20 alunos responderam que a distância TB-B é menor que a distância TB-A. No item (c), 4 alunos responderam corretamente ($TB-B = TB-A$) e 20 alunos responderam que a distância TA-B é maior que a distância TA-A. As respostas que afirmam a assimetria entre as distâncias não estão de acordo com a noção relativística de referencial, mas são consistentes tanto com a Relatividade Galileana quanto com a concepção de senso comum. Para o item (d), 11 alunos afirmaram que a assimetria entre as distâncias é compatível com a invariância da velocidade da luz, 6 afirmam que não existe relação entre a assimetria e a invariância e 7 afirmam que a assimetria não é compatível. Examinando as justificativas, os autores afirmam que, para os alunos,

“a invariância da velocidade da luz significa que a luz se propaga uniformemente a partir de antena. O fato de que os trens têm velocidade em sentidos opostos explica porque os fótons não são equidistantes.”

Além disto, respostas do tipo

“O Trem TB está mais longe de A porque, além do caminho de A, existe o próprio caminho do trem.”

indicam que a combinação de movimentos está sendo efetuada a partir da combinação geométrica das distâncias percorridas, na forma da “componente descritiva” do “modelo natural” proposto por SM.

Outra contribuição importante na compreensão das concepções alternativas em TRR foi dada por Scherr, Shaffer e Vokos (2001) (SSV) ao estudar as noções de relatividade da simultaneidade e de sistemas de referência em alunos em diversos estágios do curso de graduação e em alunos graduados da Universidade de Washington. Examinaremos, em detalhe, os resultados apresentados por estes autores, pois lançam luz sobre a intrincada relação entre a construção da noção de referencial na TRR e a compreensão dos fenômenos tipicamente relativísticos, como a relatividade da simultaneidade e da sincronização dos relógios, a dilatação do tempo e a contração dos comprimentos.

O problema clássico da simultaneidade de eventos pode ser colocado na forma que segue. Consideramos uma plataforma muito longa e uma nave que desloca paralelamente a plataforma. No referencial solidário a plataforma, a nave se desloca com velocidade v . Existe um conjunto de observadores localizados ao longo da plataforma que possuem relógios sincronizados e detectores de sinal de luz. O mesmo ocorre no referencial solidário à nave. Supomos que existem duas antenas A e B, uma em cada extremidade da plataforma. Chamamos de D1 o detector no centro da nave e D2 o detector no centro da plataforma. Quando os dois detectores se cruzam, as antenas A e B emitem pulsos de luz, que serão tratados como eventos. Tanto os observadores solidários a estação quanto os observadores solidários à nave concordam quanto a seguinte ordem dos acontecimentos:

1. o pulso oriundo da antena A é detectado por D1;
2. ambos os pulsos são detectados juntos por D2 e;
3. o pulso oriundo do antena B é detectado por D1;

Os observadores solidários a plataforma detectam a passagem dos pulsos e determinam que estes se propagam como frentes de onda esféricas centradas na posição das antenas, equidistantes a D2. Então, levando em conta o afirmado no item 2, estes observadores concluem que as emissões foram simultâneas.

Para os observadores solidários a nave, a plataforma, as antenas e o detector D2 estão em movimento da proa para a popa da nave, que permanece em repouso. As frentes de onda se expandem em torno dos pontos fixos onde ocorreram as emissões, independente do movimento das antenas. Os observadores também determinam que estes pontos fixos são equidistantes a D1. Como o detector D2 está mais próximo da popa do que da proa da nave, a única forma dos observadores solidários a nave justificar o que ocorre no item 2 é supor que o evento A ocorreu antes do evento B. Em outras palavras, para estes observadores, as emissões não foram simultâneas e, por isso, foram detectados por D1 em momentos diferentes. Novamente, a descrição fica simplificada quando consideramos as noções ontológicas de referencial e da propagação de uma frente de onda esférica cujo centro está fixo.

Para entender de forma progressiva como os alunos articulam o conceito de sistema de referência para descrever a simultaneidade de eventos, SSV propuseram uma sequência de problemas envolvendo a determinação da ordem temporal de eventos por observadores solidários a referenciais em movimento relativo. Nestes problemas, é dada aos alunos a informação sobre o ordenamento de eventos para um observador e questionado qual é o ordenamento para um segundo observador. Todas as questões são variantes do problema da simultaneidade. Ressaltamos novamente que as concepções alternativas são explicitadas a partir de um procedimento hermenêutico, ou seja, de interpretação das respostas a partir do contexto descrito acima, que é coerente com a TRR.

A primeira questão administrada envolve dois vulcões, Monte Rainier e Monte Hood, que entram em erupção simultaneamente de acordo com um observador em repouso em relação ao solo e localizado em uma posição equidistante dos dois vulcões. Uma nave se move com velocidade relativística do Monte Rainier para o Monte Hood. As questões formuladas procuram investigar as crenças dos alunos sobre o ordenamento destes eventos visto por outro observador em movimento relativo ao primeiro.

A administração deste teste, considerada preliminar, 45% dos estudantes respondeu a questão apresentando o ordenamento correto, com a justificativa correta. 25% responderam corretamente com justificativa incompleta e 25% responderam com a ordem inversa. A seguinte resposta típica foi considerada incompleta pelos autores (SSV,p.S27):

“Monte Hood sofreu erupção primeiro porque a espaçonave se move na sua direção, assim a frente de onda oriunda do Monte Hood atingirá a nave primeiro”.

Esta resposta é considerada incompleta, pois só faz referência ao ordenamento do encontro da nave com a frente de onda oriunda das erupções. Para completar a resposta, deveria ter sido feita referência à determinação, executada pelos observadores solidários a nave, de que os pontos de emissão das frentes são equidistantes a nave (que está em repouso). Ou seja, é necessário que o aluno descreva a situação do ponto de vista do referencial solidário a nave. A simples determinação da sequência da detecção das frentes de onda não é suficiente para determinar a ordem dos eventos, pois observadores em diferentes posições do referencial receberão as frentes de onda em tempos distintos, mesmo que os eventos sejam simultâneos.

Para investigar em mais detalhe as concepções que influenciam esta falha no uso da noção relativística de referencial, os autores propuseram uma variação sobre a questão, tomando a mesma

situação da pergunta anterior, com a diferença de que a espaçonave está sobre o Monte Rainier quando este sofre a erupção. Os autores consideram típica a resposta abaixo (SSV, p.S28-S29)

“A espaçonave está mais próxima do [Monte] Rainier, então [a espaçonave] recebe o sinal quase ao mesmo tempo em que [o Monte entra em] erupção. Assim, o piloto da espaçonave deve dizer que [o Monte] Rainier entrou em erupção primeiro”.

Ou

“O Monte Rainier entra em erupção primeiro porque a luz do Monte Hood leva um tempo para chegar na espaçonave.”

As afirmações apresentam uma confusão entre tempo de ocorrência dos eventos e tempo de detecção por um observador. Estas respostas podem ser interpretadas em termos de duas concepções alternativas interdependentes. Primeiro, a concepção de que a ordem de ocorrência dos eventos é a ordem em que os sinais são detectados pelo observador. A segunda, a concepção onde o observador é tratado de forma isolada e não como parte de um conjunto de observadores que podem trocar informações entre si. Como afirmam os autores, esta concepção revela a *“tendência de tomar o observador como dependente apenas do seu ou sua experiência sensorial pessoal”* (SSV, p. S29). Este resultado também é consistente com o modelo de SM e com os nossos próprios resultados descritos acima.

Outra dificuldade apresentada pelos estudantes foi a de reconhecer a relatividade da simultaneidade de eventos, apresentando a tendência a considerar esta reatividade como uma consequência dos diferentes tempos de viagens dos sinais emitidos pelos eventos. Segundo os autores, quando os alunos eram questionados sobre a necessidade de realizar as correções devidas ao tempo de propagação do pulso, suas respostas indicavam claramente que, se o observador da nave fizesse estas correções, ele perceberia que os eventos realmente foram simultâneos. Este fato é ilustrado pela seguinte manifestação (SSV,pS.31)

“Não há diferença real entre a espaçonave e o observador [que esteja] no solo, abaixo da espaçonave... Eu disse que o sinal atinge [aquele observador] em tempos diferentes, mas ele pode determinar em que momento os sinais foram emitidos... Eu posso fazer a mesma coisa na espaçonave: eu posso ver os sinais em tempos diferentes, mas eu posso me dar conta que eles ocorreram ao mesmo tempo”

Os estudantes afirmam que, após os observadores solidários ao referencial da nave realizarem as correções necessárias, eles concluirão que os eventos foram simultâneos. Esta conclusão é diretamente contrária à noção relativística de referencial e indicam que os estudantes acreditam que a simultaneidade é absoluta. Outra manifestação resgata as concepções de senso comum 1. e 2. discutidas acima para justificar o caráter absoluto da simultaneidade de eventos (SSV, p.S31)

“O seu sistema de referência é algo que você carrega com você... a relatividade da simultaneidade é esta coisa local. Não é uma coisa de réguas e relógios, porque, se nós somos inteligentes, nós faremos a correção. Se eu os vejo em tempos diferentes, eles ocorreram em tempos diferentes no meu sistema de referência.”

Também a noção de “real” e aparente é resgatada para concluir que a relatividade da simultaneidade é apenas “aparente”, enquanto a simultaneidade absoluta é real. A não simultaneidade “aparente” é atribuída a diferentes distâncias do observador ao evento e não a velocidade relativa entre o observador e a fonte. Este resultado indica um esforço do estudante em ancorar a noção de relatividade da simultaneidade em um esquema conceitual onde prevalece a noção de simultaneidade absoluta. Esta tendência a resgatar concepções do senso comum para dar conta de efeitos relativísticos aparece em outra concepção: a tendência a considerar que cada

observador constitui um sistema de referência distinto. Dois aspectos desta concepção foram explorados por SSV a partir de duas variações da questão da espaçonave. No primeiro caso, foram consideradas duas explosões não simultâneas em um dado sistema de referência e foi perguntado se existiria um referencial onde estas explosões seriam simultâneas. A separação espacial das explosões era de 3000 m e a separação temporal era tal que $c\Delta t = 1200$ m, determinadas por um engenheiro em repouso em relação ao solo. Mesmo estudantes que resolveram esta questão corretamente, indicando o valor da velocidade relativa como sendo $v = 0,4 c$, afirmam que os eventos serão simultâneos apenas para um observador cuja posição coincida com a do engenheiro. Em outras palavras (SSV, p.S31)

“Você deve viajar a $0,4 c$ e deve estar no ponto onde o engenheiro está.”

ou (SSV, p.S32)

“Não há sistema de referência onde você sempre verá as duas explosões ao mesmo tempo, mas sim uma posição.”

Nestas afirmações, dois observadores em movimento relativo, mas no mesmo ponto do espaço, perceberiam os eventos como simultâneos. Já os outros observadores do referencial em movimento em relação ao engenheiro não perceberiam os eventos como simultâneos. Novamente temos uma quebra da noção relativística de referencial, pois não foi considerado que os observadores devem corrigir as medidas de tempo levando em conta o tempo de propagação do pulso para determinar a simultaneidade dos eventos. Esta dissociação da noção de observador e referencial permite afirmar que observadores solidários a referenciais distintos podem chegar as mesmas conclusões sobre o ordenamento temporal de eventos.

O segundo aspecto foi explorado pela questão do “sismólogo”. Nesta questão, dois sismólogos fixos em relação aos montes detectam as erupções. Um está equidistante aos eventos e outro, o assistente, está junto à base do Monte Reinier. Neste caso, é perguntado aos estudantes sobre a ordem relativa das duas erupções. Segundo os autores, a maioria dos estudantes que responderam à questão afirmou que, no “referencial do assistente”, a erupção do Monte Reinier ocorre primeiro. Novamente, a noção de referencial utilizada não é aquela sustentada pela TRR. Vejamos uma justificativa de um aluno apresentada pelos autores (SSV, p.S32)

“Assumindo que o assistente está no seu sistema de referência, Rainier sofrerá erupção primeiro porque ele vê sua luz primeiro, e, até ele ver sua luz, efetivamente [a erupção] não terá ocorrido ainda.”

Assim, dois observadores em repouso relativo são desconectados do mesmo referencial, sendo tratados como pertencentes (ou possuindo) diferentes referenciais. Novamente, concepções do senso comum são retomadas e as correções devidas ao tempo de viagem da luz são abandonadas.

A noção de perfil conceitual de referencial e os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da TRR.

O exame das concepções alternativas presentes nos três problemas apresentados na seção anterior permite estabelecer alguns aspectos gerais dos obstáculos epistemológicos ao entendimento da TRR. A perspectiva teórica definida pela noção de perfil conceitual de referencial reconhece a importância dos conceitos epistemológicos, ontológicos e metafísicos na configuração do quadro geral onde se inscrevem as possíveis descrições de um determinado fenômeno físico. As respostas dadas ao problema da produção e decaimento de múons, por exemplo, indicam que os alunos não conseguem diferenciar as descrições destes fenômenos físicos a partir de distintos referenciais, mas

sim mantém a noção de que existe um referencial privilegiado para a descrição do problema. Mesmo os alunos que respondem corretamente o problema numérico não diferenciam a noção de observador e referencial, indicando que não desenvolveram o conceito relativístico de referencial. Os resultados de Villani e Pacca (1987) indicam que os alunos investigados ainda usam uma forma de raciocínio compatível com o “modelo SM” e não são capazes de articular o segundo postulado da TRR para descrever a situação física nos referenciais onde a fonte do pulso eletromagnético está em movimento.

O trabalho de SSV é ainda mais revelador. Os resultados apontam para a iniciativa dos alunos de tentar absorver diferentes aspectos da relatividade da simultaneidade de eventos, característica da TRR, em uma estrutura conceitual que tem a simultaneidade absoluta e universal como uma de suas noções ontológicas mais firmes. Para tanto, o aluno rompe com a noção de referencial da TRR, retomando a concepção de referencial oriunda do senso comum, o que se manifesta nos três seguintes aspectos. Primeiro, a relatividade da simultaneidade é atribuída a diferenças de tempo de detecção de eventos que ocorrem a diferentes distâncias do observador e não ao movimento relativo entre referenciais. Segundo, a vinculação da simultaneidade de eventos a um observador e não a um conjunto de observadores que definem um referencial. Terceiro, a consideração de que observadores em repouso relativo, mas separados no espaço, estão em sistema de referência distintos. Salientamos ainda que, segundo os resultados da literatura discutidos, mesmo os estudantes de pós-graduação apresentam noções ontológicas não plenamente identificadas com aquelas da TRR.

As respostas aos problemas discutidos na seção anterior evidenciam também o fato de que a mudança conceitual, na forma prevista por Posner et al.(1982), não ocorre, pois mesmo os alunos que articulam as equações e dão respostas analíticas ou numéricas corretas no contexto TRR retomam as suas concepções de senso comum quando são instigados a articular conceitualmente os diferentes aspectos da teoria. Além disso, as respostas evidenciam quão firme são os compromissos dos alunos com os conceitos ontológicos e metafísicos de espaço, tempo e referencial absolutos. Quando estes conceitos são postos à prova, por exemplo, pela relatividade da simultaneidade, o aluno desenvolve formas de raciocínio alternativas que tentam dar significado às novas situações físicas examinadas dentro de um contexto ontológico do senso comum. Aqui emerge uma característica do perfil conceitual que ainda não havia sido tratada: as diferentes regiões do perfil de referencial não são caracterizadas apenas por conceitos epistemologicamente e ontologicamente diferenciados, mas também por formas de raciocínio diferenciadas e logicamente incompatíveis. Estas formas de raciocínio, diferentes em cada região do perfil, são as estratégias elaboradas espontaneamente pelos alunos para dar significado às situações físicas com as quais são confrontados.

É importante notar que não é a existência, em si, dos compromissos epistemológicos, ontológicos e metafísicos que constituem os obstáculos epistemológicos. Estes compromissos existem sempre e constituem os aspectos gerais da descrição do mundo, a moldura geral no qual se inscreve o quadro definido por qualquer teoria, científica ou de senso comum. Cada região do perfil de referencial está vinculada a um conjunto de compromissos desta natureza. Os resultados da seção anterior indicam que a origem dos obstáculos está associada à dificuldade do aprendiz de relativizar seus compromissos com o senso comum. Além disso, a não consciência do aluno sobre seu próprio perfil limita a identificação e a diferenciação destes compromissos.

Como consequência, o aluno busca entender conceitos da MN ou da TRR dentro de um quadro de compromissos epistemológicos, ontológicos e metafísicos do senso comum. Esta atitude impede que seja realizada a articulação conceitual apropriada para a assimilação dos novos conceitos. Perante um problema da nova teoria que exija uma articulação conceitual, o aluno retorna ao senso comum, que representa, para ele, uma perspectiva ontológica mais ampla e significativa.

Os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da TRR apresentam um duplo aspecto que podem ser entendidos tendo como referência o perfil conceitual de referencial. Acompanhando Vilani e Pacca (1990), afirmamos que, na aprendizagem de uma nova teoria, “A origem das dificuldades é dupla: uma relacionada ao conteúdo físico e outra relacionada com as formas de argumentação”. No primeiro caso, o obstáculo epistemológico à compreensão de um novo conceito ou noção se estabelece quando o aprendiz procura ancorar este conceito (ou noção) em uma zona não adequada do perfil. Por exemplo, a noção de relatividade da simultaneidade pode ser ancorada na noção relativística de referencial. No entanto, a dificuldade de relativizar os compromissos ontológicos e epistemológicos e a falta de consciência sobre a existência de um perfil leva o aluno a tentar ancorar esta noção na zona do senso comum do seu perfil conceitual de referencial. Neste caso, os conceitos “âncora”, muitos deles de dimensão ontológica e metafísica, não guardam uma coerência lógica com o conceito a ser apreendido e a aprendizagem significativa fica prejudicada.

Na tentativa de realizar a “ancoragem forçada” de conceitos, sejam da MN ou da TRR, em um substrato de conceitos subsunsores do senso comum, o aluno desenvolve o segundo aspecto dos obstáculos epistemológicos, as ditas “formas espontâneas de argumentação”. As formas de argumentação são as articulações utilizadas para dar significado aos novos conceitos a serem apreendidos, descrevendo-os em termos dos conceitos já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz. As “formas espontâneas” surgem da tentativa de articular conceitos de uma região do senso comum do perfil para integrar conceitos da MN ou da TRR que não são logicamente coerentes com esta região, criando obstáculos epistemológicos. Tomando os exemplos da seção anterior, consideramos que as noções ontológicas de espaço, tempo e referencial absolutos levam a relatividade da simultaneidade de eventos a ser interpretada como um efeito “aparente”, tendo origem nos diferentes tempos de chaga dos pulsos no observador “absoluto”.

A partir desta análise, concluímos que os obstáculos epistemológicos têm uma dupla origem: uma conceitual e outra heurística. O obstáculo conceitual surge quando o aprendiz tenta ancorar um novo conceito na região não apropriada do seu perfil conceitual. O obstáculo heurístico surge a partir da elaboração de uma forma de argumentação que procura realizar a ancoragem discutida acima. Estas “formas espontâneas de argumentação” têm um formato “ad hoc” e acabam também por inviabilizar uma articulação ampla e coerente dos conceitos da nova teoria.

Conclusões

Desenvolvemos este trabalho utilizando a noção de perfil conceitual de referencial como elemento teórico mediador para o entendimento dos obstáculos epistemológicos e da possibilidade de aprendizagem da TRR. Este perfil se estabelece em três regiões: a região de senso comum, a região Newtoniana e a região relativística. Nossos resultados mostram que estes obstáculos têm origem em dois elementos complementares: a tentativa de ancorar conceitos relativísticos em um substrato conceitual (subsunsores) característico do senso comum e o desenvolvimento de formas espontâneas de argumentação para efetivar tal ancoragem. Pelas discussões anteriores, concluímos que isto ocorre porque a região Newtoniana do perfil de referencial não está consolidada e o aprendiz ainda não é capaz de lidar com os conceitos fundamentais da região relativística. A limitação no domínio destas duas regiões leva os alunos à tentativa de articular conceitos da região do senso comum para dar significado a efeitos tipicamente relativísticos, como a dilatação do tempo, a contração da distância e a relatividade da simultaneidade.

Outro aspecto que limita a aprendizagem da TRR é a falta de reconhecimento da dimensão ontológica e metafísica dos conceitos de espaço, tempo, evento e referencial associados à TRR, o que traz consigo a limitação na construção dos significados dos conceitos desta teoria, prejudicando sua aprendizagem significativa. De forma geral, nossos resultados permitem afirmar que a estrutura que utilizamos para dar significado a um dado conceito não é monolítica, mas sim dividida em

regiões ou zonas de significação, que se manifestam na forma de um perfil. Além disso, as noções epistemológicas, ontológicas e metafísicas possuem papel fundamental neste processo de construção do significado.

À guisa de conclusão, traçamos as linhas gerais de uma metodologia de ensino-aprendizagem definida no quadro teórico estabelecido pela noção de perfil conceitual de referencial. Nos seus aspectos mais amplos, a metodologia deve favorecer a consolidação da região Newtoniana do perfil e a criação da região relativística, tendo a noção de referencial como conceito aglutinador sobre o qual se desenvolve os significados de outros conceitos. Estes dois processos se dão de forma integrada, pois a criação de uma nova região implica também a delimitação do domínio de aplicabilidade das zonas preexistentes. Esta dinâmica deve ser facilitada à medida que o aprendiz desenvolve uma autoconsciência sobre o seu perfil conceitual.

Em termos de atividades, consideramos a seguinte sequência a ser desenvolvida em um curso introdutório à TRR:

- Explicitar as concepções dos alunos sobre adição de movimentos, sobre referencias e sobre as leis de Newton;
- Revisar estas concepções no contexto da MN, comparar as concepções dos alunos e as suas formas de argumentação com aquelas cientificamente aceitas no domínio da Mecânica. Dar ênfase a adição de movimentos, a descrição do movimento em termos de referenciais e ao papel dos conceitos metafísicos;

Os conflitos que possam surgir desta comparação entre concepções não tem o objetivo de provocar a mudança conceitual, no sentido estabelecido pelo Modelo de Mudança Conceitual, mas sim promover a consciência do aluno sobre suas concepções e sobre a sua utilização das formas de argumentação. Esta atividade deve diferenciar, progressivamente, as noções ligadas ao senso comum das noções associadas à MN, diferenciando e consolidando as regiões do perfil.

- Apresentar os postulados da TRR, o conceito de relativístico de referencial e as formas de argumentação centradas na noção de evento;
- Buscar explicitar as concepções alternativas e as formas espontâneas de argumentação em TRR;
- Explicitar constantemente as diferenças que os conceitos e as formas de argumentação relativísticas guardam com a MN e com o senso comum.

Os dois últimos pontos destacados podem ser desenvolvidos separadamente para diversas situações físicas onde estejam em jogo os efeitos relativísticos como a dilatação do tempo, a contração da distância, a sincronização dos relógios e a relatividade da simultaneidade. O exame de um número cada vez maior de situações físicas similares deve levar a elaboração e a diferenciação progressiva das regiões do perfil e, concomitantemente, à construção da estrutura cognitiva adequada para a compreensão da TRR. Uma proposta de atividades de ensino embasada nesta metodologia é parte do nosso trabalho em andamento.

Referências

ALQUIÉ, F., RUSSO, F., BEAUDE, J., TONNELAT, M. A., COSTABEL, P. & POLIN, R. (1987) *Galileu, Descartes e o Mecanismo*. Lisboa: Gradiva.

AMARAL, E. M. R. e MORTIMER, E. F. (2001) Uma Proposta de Perfil Conceitual para o Conceito de Calor. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 1, n. 3, pp. 5-18, Bauru, SP : ABRAPEC.

- ARRUDA, S. M. & VILLANI, A.(1994) Mudança conceitual no ensino de ciências. *Caderno Catarinense de Ensino de Ciências*. v. 11, n. 2, p. 88-99.
- A1 (2007) A construção de um Perfil Conceitual de referencial na aprendizagem da Teoria da Relatividade.
- BACHELARD, G. (1984). *A Filosofia do não*; In: OS PENSADORES. São Paulo: Abril Cultural, p. 01-87.
- BACHELARD,G. (1996). *A formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Editora Contraponto.
- BURT, E. A. (1983). *As bases metafísicas da ciência moderna*. Brasília, Editora da Universidade de Brasília.
- COUTINHO, F. A., MORTIMER, E. F. & EL-HANI, C. N.(2007). Construção de um perfil para o conceito biológico de vida. *Investigações em Ensino de Ciências*. v.12, n.1, pp.115-137.
- EINSTEIN, A. (2001a). Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. In:STACHEL, J. (Ed.) *O ano miraculoso de Einstein*. Rio de Janeiro: editora da UFRJ, p117-141.
- EINSTEIN, A. (2001b). A inércia de um corpo depende do seu conteúdo de energia? In:STACHEL, J. (Ed.) *O ano miraculoso de Einstein*. Rio de Janeiro: editora da UFRJ, p183-186.
- EMMECHE, C. & EL-HANI, C. N.(2005). Definindo vida. In: EL-HANI, C. N., VIDEIRA, A. A. P. (Org). *O que é vida? Para entender a biologia do século XXI*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, p 31- 56.
- HEWSON, P. W.(1981). A conceptual change approach to learning science. *European Journal of Science Education*. v. 3, n.4, p. 383-396.
- HEWSON, P. W.(1982). A case study of Conceptual change in special relativity: the influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*.v. 4, n.1, p. 61-78.
- KOYRE, A.(1986). *Estudos Galilaicos*. Lisboa: Publicações Dom Quixote.
- KUHN, T.S.(2003a). *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Editora Perspectiva.
- KUHN, T. S (2003b). Comensurabilidade, comparabilidade, comunicabilidade. In: CONANT, J. e HAUGELAND, J. O (Org).*Caminho desde A estrutura: Ensaios filosóficos, 1970-1993, com uma entrevista autobiográfica*. São Paulo: Fundação editora da UNESP.
- LAKATOS, I.(1998). *A história das ciências e suas reconstruções racionais*. Lisboa: edições 70.
- MOREIRA, M. A. (2003). *Aprendizaje significativo: fundamentación teórica e estratégias facilitadoras*. Porto Alegre: Instituto de Física, UFRGS.
- MORTIMER, E.F. (1995) Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3): 265-287.
- MORTIMER, E. F. (1996). Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 1, n. 1.
<<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/N1/2artigo.htm>> Acesso em 10 jul. 2007.

MORTIMER, E. F. (2000). *Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências*. Belo Horizonte: editora da UFMG.

MORTIMER, E. F. , SCOTT, P. e Charbel N. EL-HANI, C. N. (2009) Bases Teóricas e Epistemológicas da Abordagem dos Perfis Conceituais. In: *Anais do VII ENPEC - Encontro Nacional de Pesquisadores em Educação em Ciências*, Florianópolis, SC, 8 a 13 de Novembro de 2009. Disponível em <<http://www.foco.fae.ufmg.br/viiienpec/index.php/enpec/viiienpec/paper/view/22/383>> Acesso em 25 de maio de 2010.

NEWTON, I. (2002). *Princípios matemáticos da filosofia natural*. São Paulo: Edusp.

NICOLLI, A. A. e MORTIMER E. F. (2009) Construção de Um Perfil para o Conceito de Morte. In: *Anais do VII ENPEC - Encontro Nacional de Pesquisadores em Educação em Ciências*, Florianópolis, SC, 8 a 13 de Novembro de 2009. Disponível em <<http://www.foco.fae.ufmg.br/viiienpec/index.php/enpec/viiienpec/paper/view/755>> Acesso em 25 de maio de 2010.

OSTERMAN, F. & MOREIRA, M. A.(2000). Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1. <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5_n1_a2.htm> Acesso em 12 jul. 2007.

PANSE, S., RAMADAS, J. & KUMAR, A. (1994). Alternative conceptions in Galilean relativity: frames of reference. *International Journal Science Education*, v. 16, n. 1, p. 63-82.

POSNER, J. G.; STRIKE, K.A.; HEWSON, P. W. & GERTZOG, W. A.(1982) Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*. v. 66, n.2, p. 211-227.

SANTOS, R. P. e MÉNECH, A. D. (2005) Uma Proposta para o Perfil Conceitual do Conceito de Massa na Física. In: *Anais do IX EPEF - Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*, Jaboticatubas, MG, SBF, 26 a 30 de Outubro de 2004, São Paulo: SBF.

SATIEL, E., MALGRANGE, J. L. (1980). ‘Spontaneous’ ways of reasoning in elementary kinematics. *European Journal of Physics*, Northern Ireland, v. 1, p.73-80.

SCHERR, R. E. SHAFFER, P. S. & VOKOS, S. (2001). Student understanding of time: special relativity: simultaneity and reference frames. *Physics Education Research. American Journal of Physics Supplement*.v.69, n.24, p. S24-S35..

SCHERR, R. E. SHAFFER, P. S. & VOKOS, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *Physics Education Research. American Journal of Physics Supplement*.v.70, n.12, p. 1238-1248.

SILVEIRA, F. L. & PEDUZZI, L. O. Q. (2006). Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. v.23, n.1, p.26-52.

STRIKE, K.A. & POSNER, J.G. (1982). Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*. v. 4, n.3, p. 231-240.

TOULMIN, S. (1972). *Human Understanding*. Princeton. Princeton University Press.

VIDEIRA, A. A. P. (2005). Para que servem as definições? In: EL-HANI, C. N. & VIDEIRA, A. A. P. (Org). *O que é vida? Para entender a biologia do século XXI*. Rio de Janeiro. Relume Dumará, p. 17- 30.

VILLANI, A. & PACCA, J.L.A.(1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal Science Education* v.9, p, n.1, p. 55-66.

VILLANI, A. & PACCA, J.L.A.(1990). Spontaneous reasoning of graduate students. *International Journal Science Education* v.12, p, n.5, p. 589-600.

Recebido em: 08.12.2009

Aceito em: 24.06.2010

Apêndice – Problema dos trens de Villani e Pacca (1987).

Considere dois trens TA e TB que se deslocam na mesma direção e sentidos opostos com velocidade $v = c/2$ em relação aos trilhos, sendo que TB se desloca da esquerda para a direita. Em um determinado instante de tempo, estes dois trens se cruzam em uma estação. Neste instante, a antena de rádio da estação emite dois sinais eletromagnéticos A e B em sentidos opostos, sendo que o sinal A é emitido no mesmo sentido do movimento de TA e o sinal B é emitido no sentido de TB . Considere a existência de uma antena receptora C , disposta a uma distância L à direita da estação, que detecta a passagem do sinal B .

(a) A que distância da antena emissora estarão os trens TA , TB e o sinal A quando o sinal B atingir a antena C ? Justifique sua resposta.

(b) Suponha que você seja um passageiro do trem TB . Quando o sinal B atinge a antena C , quais dos dois sinais (A ou B) está mais próximo de você? Justifique sua resposta.

(c) Suponha que você seja um passageiro do trem TA , qual dos sinais está mais próximo de você? Justifique sua resposta.

(d) Suas respostas às questões anteriores são coerentes com a noção de invariância da velocidade da luz? Justifique sua resposta.

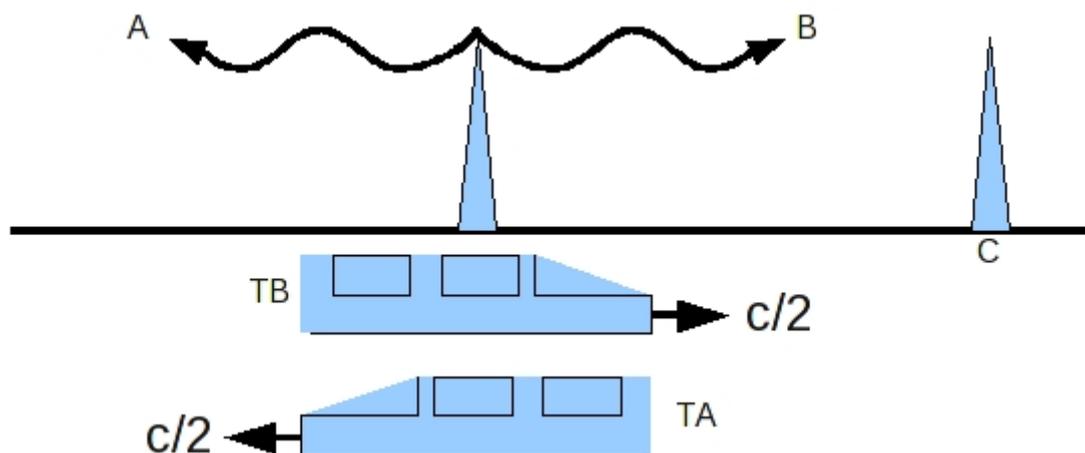


Figura 1. O problema dos trens de Villani e Pacca (1987).