

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Educação

**INVARIANTES OPERATORIOS NA
TRANSIÇÃO ENTRE DOIS CAMPOS
CONCEITUAIS : O CASO DO TEMPO
RELATIVO**

Gabriel Dias de Carvalho Júnior
Belo Horizonte – MG
2013

Gabriel Dias de Carvalho Júnior

**INVARIANTES OPERATÓRIOS NA TRANSIÇÃO ENTRE DOIS
CAMPOS CONCEITUAIS : O CASO DO TEMPO RELATIVO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação da Faculdade de Educação da Universidade Federal de Minas Gerais para o exame de qualificação, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Educação.

Linha de Pesquisa: Educação e Ciências

Orientador: Prof. Dr. Orlando G. Aguiar Júnior.

Co-Orientador : Profa. Dra. Silvia Parrat-Dayan

**Universidade Federal de Minas Gerais
Faculdade de Educação
Belo Horizonte – MG
2013**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Gabriel Dias de Carvalho Júnior

Título: Invariantes Operatórias na Transição entre dois campos conceituais

Subtítulo: O caso do tempo relativo

Tipo de Trabalho: Tese de Doutorado

Banca Examinadora:

Nome: Professor Doutor Mikael Rezende Frank Junior

Nome: Professora Doutora Sandra Bruno

Nome: Professora Doutora Regina Helena Campos

Nome: Professor Doutor Helder Figueiredo de Paula

Nome: Professor Doutor Orlando Gomes Aguiar Júnior (Orientador)

PARECER:

Grau : aprovado (x) reprovado () reformular ()

Local: Belo Horizonte Data: 26/11/2013

Assinatura dos Examinadores:

Prof. Dr. Mikael Rezende Frank Junior

Profa. Dra. Sandra Bruno

Profa. Dra. Regina Helena Campos

Prof. Dr. Helder Figueiredo de Paula

Prof. Dr. Orlando Gomes Aguiar Júnior

DEDICATÓRIA

Preparação, expectativas, esperas ! Realizar uma tese é um processo complicado, cheio de surpresas !

Agora, parece que as coisas fazem sentido, como em um movimento de *prise de conscience*...

Em um mundo em que « só a mudança é permanente » tenho sorte, orgulho e profunda alegria de partilhar minha existência com Andressa, razão primeira do que já fiz, faço e farei. Andressa que me deu o que há de mais belo : o amor sublime que se materializou em Gabriel Henrique, Thales e Giulia. A mulher que mora no meu coração, que me faz sonhar e viver no real !

É a origem de tudo que existe de mais belo em mim.

Dedico a você, Andressa ! Com amor e admiração !

AGRADECIMENTOS

Há muitas pessoas que contribuíram para a realização de todas as etapas desse trabalho que, às vezes, fico me questionando se ele deveria ter a identificação do meu nome como autor.

Os primeiros são Andressa, Gabriel Henrique e Thales que fizeram cursos sobre Vergnaud e Piaget juntamente comigo, me ajudaram a melhor compreender as teorias. Em longas e boas conversas, aprendi com eles tentando compreender a forma como cada um significou os conceitos que estudava. Agradeço por todos os momentos em que sonharam comigo esse sonho e pelo apoio irrestrito que tornou material esse sonho. Por abrirem mão de família, amigos, namorada para cruzar o Atlântico em busca de um ideal. Obrigado por serem as raízes que permitem a criação de antenas.

Muito obrigado aos que enviaram bons fluidos e que, com isso, ajudaram a me manter no prumo. Pai, Mãe, Lara, Letícia e Lucas, todos os Carvalhos e os Henriques, que me dão história, o que me faz ter alma e coração.

Arcanjo, Zelinha, Jussara, Cassiano, Nayara, Mariana, Vanessa, Eduardo, Isabela, Clarissa e Kenys : vocês não foram minha família por nascimento, mas pela escolha do coração.

Sérgio e Olívia, que nos mostraram a beleza da amizade e do companheirismo. Vocês são mais que amigos, são irmãos de corpo e alma ! Agradeço ao Márcio por nos apresentar.

Agradecimento eterno aos amigos, pelo apoio e encorajamento. Em especial, gostaria de agradecer a Cátia Lopes, que me ensinou que « o tempo é energia mental » e me ajudou a me encarar de frente, o que é difícil, mas necessário !

Agradeço ao IFMG pela liberação para o estágio sanduíche e pelo apoio para a realização da pesquisa. Ao Diretor Geral do Campus Congonhas, professor Eleonardo Pereira, à Pró-Reitora de Pesquisa, professora Lydia Muzzi, meu agradecimento.

Gostaria de agradecer aos professores do departamento de Física do IFMG por me apoiarem na realização do estágio sanduíche. Em especial, agradeço ao Coordenador do Curso de Física, professor Ronan Daré. Em primeiro lugar, pela amizade de longa data, que muito me honra ! Depois, pela brilhante participação na

pesquisa, como professor. Por fim, por todo o apoio durante a realização da pesquisa.

Muito obrigado a Gustavo, Matheus, Roberto e Vanessa pelas perguntas, pelos questionamentos e, principalmente, pela confiança.

Agradeço a oportunidade de ser orientado pelo Orlando que, com toda sua sabedoria e humildade, me permitiu trilhar meu caminho. Os ensinamentos e a presença foram marcantes !

Meu especial agradecimento à Sílvia Parrat pela disponibilidade, alegria e paciência. Aprendi muito com você ! Não somente sobre Piaget, mas sobre como encarar a vida e sobre o partilhamento do saber.

Obrigado a todo o pessoal dos Archives Jean Piaget, em especial a Kathilin. Muito obrigado à professora Regina Helena, que muito me ajudou a conseguir o estágio « sanduíche » em Genebra.

Meu agradecimento ao professor Helder de Paula, pela análise do projeto de pesquisa e pela participação na banca da qualificação.

Agradeço aos professores que aceitaram compor a banca da defesa, pela disponibilidade, pela leitura atenta do trabalho e pelos comentários.

Meu agradecimento a Nilmara Mozer pela leitura do texto para a qualificação e pelos comentários que me ajudaram na melhor compreensão da TCC.

Muito obrigado a Sandra Bruno pela disponibilidade em me receber em Paris 8 e pelas discussões que muito me auxiliaram na interpretação dos dados da pesquisa à luz da Teoria dos Campos Conceituais.

Um « grand merci » a Gérard Vergnaud. Gérard se mostrou extremamente solícito e disponível para ensinar. Em 2010 nos conhecemos pessoalmente e ele se mostrou amável e atencioso. Quando nos encontramos em Paris, em 2011, ele foi um anfitrião sem igual. Tivemos a oportunidade de retribuir durante a qualificação, onde nos foi possível conviver com Gérard. A presença em nossa casa foi absolutamente fantástica para todos. Aprendemos, conhecemos, conversamos, rimos ... Entre longas viagens de carro, comidas mineiras e formigas, conhecemos melhor a grandiosidade dessa figura única. Nas seções de trabalho em Paris 8, nos anos de 2012 e 2013, foi possível conhecer mais de perto sua maneira de ensinar e de estar junto. Obrigado, Gérard !

Por fim, agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização desse trabalho.

*« J'ai travaillé
Des années
Sans répit
Jour et nuit
Pour réussir
Pour gravir
Les sommets
En oubliant
Souvent dans
Ma course contre le temps
Mes amis, mes amours, mes emmerdes*

*A corps perdu
J'ai couru
Assoiffé
Obstiné
Vers l'horizon
L'illusion
Vers l'abstrait
En sacrifiant
C'est navrant
Je m'en accuse à présent
Mes amis, mes amours, mes emmerdes »
Charles Aznavour*

RESUMO

Esta tese teve como questão de pesquisa: de que maneira os estudantes organizam seus conhecimentos em ação para construir a noção de tempo relativo e como utilizam essa noção para reconhecer as situações onde ela é necessária para resolver os problemas apresentados?

Investigamos a construção da noção de tempo relativo a partir da transição entre a Mecânica Clássica e a Teoria da Relatividade Restrita. Para isso, foi aplicada uma sequência didática cuja ênfase estava no estudo da relatividade do movimento e como o aparecimento da Teoria da Relatividade exigiu uma mudança no estatuto epistemológico do tempo.

A pesquisa foi aplicada em 16 horas-aula em uma sala de aula de terceira série do ensino médio de uma escola pública federal. As atividades de intervenção didática foram diversificadas (exposição teórica por parte do professor, leitura de textos, utilização de recursos audiovisuais, debate entre os estudantes e discussão em pequenos grupos).

O quadro teórico foi a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud. Além disso, promovemos uma articulação entre as ideias de Vergnaud e a formulação de esquema em Piaget, assim como utilizamos as pesquisas deste último sobre a construção da noção de tempo.

Analizamos as trajetórias cognitivas de cinco estudantes no processo de construção do tempo relativo. Assim, investigamos a evolução dos invariantes operatórios utilizados pelos estudantes.

Assim, concluímos que a compreensão do tempo relativo está ligada a um quadro mais amplo, que engloba as noções de movimento e velocidade. Nesse sentido, destacamos três pontos principais:

- (1) Conceber o tempo como um *schème* permite analisar as modificações necessárias nos invariantes operatórios necessários para que um sujeito dê conta das novidades trazidas pela Teoria da Relatividade.
- (2) Para que seja possível operar com conceitos da Relatividade, o sujeito deve realizar a assimilação recíproca entre os *schèmes* de tempo e de movimento.
- (3) O estudo da Teoria da Relatividade forneceu um novo contexto para a utilização do *schème* de movimento e permitiu a ocorrência de reformulações nos invariantes operatórios para alguns estudantes.

RÉSUMÉ

Cette thèse a eu comme question de recherche: comment les élèves organisent leurs connaissances en action pour construire la notion de temps relative et comment utilisent-ils cette notion pour reconnaître les situations où elle est nécessaire pour bien résoudre les problèmes présentes ?

Nous avons cherché la construction de la notion de temps relative dans la transition entre la mécanique classique et la théorie de la relativité restreinte. Pour faire ça, on a mené une séquence didactique dont les points centraux étaient dans l'étude de la relativité du mouvement et comment la théorie de la relativité a fait un changement dans le statut épistémologique du temps.

La recherche a été réalisée en 16 heures de cours dans une salle de classe de la troisième année d'une école publique fédérale. Les activités d'intervention didactiques ont été diversifiées (exposition théorique par l'enseignant, lecture de textes, utilisation des ressources audiovisuelles, le débat entre les élèves en petits groupes).

Le cadre théorique a été la Théorie des Champs Conceptuel de Gérard Vergnaud. En outre, nous avons fait un lien entre les idées de Vergnaud et la formulation de schème chez Piaget, ainsi que l'utilisation de la recherche de ce dernier sur la construction de la notion de temps.

Nous avons analysé les trajectoires cognitives de cinq élèves dans le processus de construction du de temps. Ainsi, nous avons étudié l'évolution des invariants opératoires utilisés par les étudiants.

Ainsi, nous avons conclu que la compréhension du temps relatif est liée à un cadre le plus large qui englobe les notions de mouvement et vitesse. À cet égard, nous avons souligné trois points principaux:

- (1) L'utilisation du temps comme un schème permet d'analyser les changements nécessaires dans les invariants opératoires nécessaires pour qu'un sujet réussisse les nouveautés apportées par la théorie de la relativité.
- (2) Pour être en mesure de fonctionner avec les concepts de la relativité, le sujet doit effectuer assimilation réciproque entre les schèmes de temps et de mouvement.
- (3) L'étude de la théorie de la relativité a fourni un nouveau cadre pour la motion du schème et elle a permis l'évolution des invariants opératoires pour certains élèves.

ABSTRACT

This thesis had as main research question: how do students organize their knowledge in action in order to build the notion of time and how do they use this notion to recognize situations where it is necessary to solve the problems?

We investigate the construction of the notion of relative time from the transition between the Classical Mechanics and Special Theory of Relativity. For this, we applied a didactic sequence whose emphasis was on the study of relativity of motion and how the Theory of Relativity demanded a change in the epistemological status of time.

The research was carried out in 16 class hours in a classroom of third grade of high school from a public school. The didactic activities were diversified (theoretical exposition by the teacher, reading texts, use of audiovisual resources, debate and discussion among students in small groups).

The theoretical framework was the Theory of Conceptual Fields by Gérard Vergnaud. In addition, we promote a link between Vergnaud's ideas and the Piaget's formulation of schème, as well we used its researches on the construction of the notion of time.

We analyze the cognitive trajectories of five students in the process of construction of the relative time. Thus, we investigated the evolution of operational invariants used by students.

Thus, we conclude that understanding the relative time is linked to a broader framework that encompasses the notions of movement and speed. In this regard, we highlight three main points:

(1) Considering time as a schème allows us to analyze the necessary changes in operational invariants required for an individual realizes the novelties brought by the Theory of Relativity.

(2) To be able to operate with concepts of relativity, the subject must carry out mutual assimilation between the schèmes of time and motion.

(3) The study the Theory of Relativity provided a new context for the schèmes of motion and it allowed the occurrence of reformulations in operational invariants for some students.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Sistemas de coordenadas	44
Esquema do interferômetro de Michelson-Morley	49
O ebulioscópio	78
Pequeno cano de vidro que liga as duas partes do aparelho	78
Relação entre os três domínios que compõem o conceito, de acordo com Vergnaud	85
Representação simbólica de uma força de intensidade F agindo sobre um corpo ..	90
Fotografia da placa que indica a ocorrência frequente de Verglas	108
História do Chico Bento	110
Representação esquemática da unidade de análise do sujeito em ação	113
Representação da figura feita pelo professor para ilustrar a explicação da dilatação temporal	164

LISTA DE QUADROS

Resumo das atividades realizadas na pesquisa	126
Comparação entre as formas de utilização do conceito de referencial pelos estudantes	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- MC – Mecânica Clássica
- TRR – Teoria da Relatividade Restrita
- FMC – Física Moderna e Contemporânea
- ZDP – Zona de Desenvolvimento Proximal
- EEG – Estudos de Epistemologia Genética
- TCC – Teoria dos Campos Conceituais
- GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)
- IO – Invariante(s) Operatório(s)
- CEA – Conceito(s)-em-ação
- TEA – Teorema(s)-em-ação
- MRU – Movimento Retilíneo Uniforme
- COEP-UFMG – Conselho de ética e pesquisa da UFMG

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1) Justificativa	17
2) Formulação do problema de pesquisa	25
3) Objetivos	27
3.1) Geral	27
3.2) Específicos	28
4) Estrutura do texto	28
CAPÍTULO 1 – O TEMPO	30
1.1) Introdução	30
1.2) Trabalhos importantes sobre a formação da noção de tempo	31
1.2.1) A noção de tempo como um <i>schème</i>	32
1.2.2) A noção de tempo como um conceito	37
1.2.3) A noção de tempo como uma representação	40
1.3) O problema da medida do tempo	41
1.4) A percepção do tempo	42
1.5) O tempo na Mecânica Clássica	43
1.6) O tempo relativístico	48
1.7) Uma primeira síntese possível	55
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO	58
2.1) A teoria dos Campos Conceituais	60
2.1.1) A noção de campo conceitual	60
2.2) Os conceitos-chave da TCC	65
2.2.1) Os Invariantes Operatórios : conceitos e teoremas em ação	65
2.2.1.1) Primeiro exemplo : sistema de referência	71
2.2.1.2) Segundo exemplo : ebulioscópio	78
2.2.2) Os conceitos	81
2.2.2.1) O conjunto das situações	86
2.2.2.2) O conjunto das representações simbólicas	90
2.2.3) Os <i>schèmes</i>	91
2.2.3.1) A noção de <i>schème</i> em Piaget	92
2.2.3.2) A noção de <i>schème</i> em Vergnaud	103
2.3) A sistematização	107
CAPÍTULO 3 – O DESENHO E APLICAÇÃO DA PESQUISA	116
3.1) Local e sujeitos da pesquisa	116
3.2) Lugar do pesquisador	119
3.3) Planejamento da pesquisa	123
3.4) A aplicação da pesquisa	127
3.4.1) 1ª aula	128
3.4.2) 2ª aula	131
3.4.3) 3ª aula	136
3.4.4) 4ª aula	141
3.4.5) 5ª aula	145
3.4.6) 6ª aula	151
3.4.7) 7ª aula	156
3.4.8) 8ª aula	162
3.4.9) 9ª aula	164
3.4.10) 10ª aula	170

3.4.11) Continuação das atividades	175
CAPÍTULO 4 – AS TRAJETÓRIAS COGNITIVAS	178
4.1) Lara	179
4.2) Cassiano	186
4.3) Nayara	193
4.4) Thales	197
4.5) Osvaldo	203
CONCLUSÃO	209
1) Introdução	209
2) Achados da pesquisa	209
2.1) Questões didáticas	209
2.2) Utilização da TCC como quadro de referência	214
2.3) Metodologia de pesquisa	218
3) Questões para novas incursões	219
4) Considerações finais	220
BIBLIOGRAFIA	223

INTRODUÇÃO

O ensino de ciências em geral e o de Física, em particular, tem sido alvo de constantes indagações ao longo dos últimos tempos, seja para se questionar dada metodologia, seja para verificar se dado conteúdo é ou não pertinente. Uma das questões centrais desse cenário situa-se no âmbito de como os conhecimentos são apresentados aos estudantes e como eles conseguem construir generalizações a partir da consecução das atividades didáticas propostas.

Em geral, percebe-se uma grande fragmentação dos conhecimentos em Física em parte significativa dos livros-texto e a apresentação de teorias como verdades absolutas e universais, com uma discussão limitada (quando existente) sobre os seus limites de validade. Esse fato contribui para a construção da ideia, por parte dos estudantes, de que o conhecimento científico é composto por verdades inequívocas e válidas em qualquer contexto.

Durante o estudo da Mecânica Clássica (MC), por exemplo, a sequência tradicionalmente utilizada nas aulas (Cinemática, Dinâmica Newtoniana, Energia, Hidrostática e Gravitação) separa conceitos essenciais em grandes intervalos de tempo pedagógico e desconecta situações que poderiam ser tratadas juntas. É essencial que os estudantes sejam colocados frente a situações de aprendizagem que permitam a aplicação dos saberes e, a partir daí, contribuam para a construção de generalizações.

No bojo dessa questão encontra-se a necessária discussão acerca da forma como ocorre a construção de teorias científicas, da validade dos conceitos e dos processos que permitem aos sujeitos se apropriarem desses saberes e os utilizarem em ação (LEDERMAN, 2007; ALLCHIN, 2004). Dessa forma, torna-se importante a compreensão acerca da construção de conceitos científicos por parte dos estudantes, identificando formas provisórias de produção de sentido, as representações construídas a partir das situações-problema apresentadas e a utilização, em ação, de regras de ação, metas, antecipações, inferências e conhecimentos.

Quando assumi, em 2009, a cadeira de Física na primeira série do Ensino Médio em uma escola pública federal no interior de Minas Gerais, comecei as discussões em mecânica pelos conceitos de referencial inercial e de força para, em

seguida, apresentar as Leis de Newton, sem iniciar o estudo pela Cinemática. Nesse âmbito, as discussões foram conduzidas no sentido de explicitar os fundamentos e os limites de tal teoria¹ e, com isso, justificar a apresentação dos princípios da Teoria da Relatividade Restrita (TRR). O estudo da Mecânica, portanto, não se restringiu à abordagem newtoniana, mas teve como ponto central o diálogo entre os modelos propostos por Newton e Einstein.

A percepção que tive, sem estar lastreada em uma pesquisa sistematizada, foi a de que as situações relacionadas às consequências dos postulados da TRR, como a dilatação do tempo, por exemplo, foram enfrentadas e resolvidas com sucesso por uma parte significativa dos estudantes. A despeito dos problemas ligados à falta de referência empírica, em minha avaliação, esses estudantes conseguiram construir a noção de tempo relativo de forma satisfatória.

Essa percepção, apesar da abrangência muito restrita, seria um possível indicativo de que o aprendizado do campo conceitual da TRR pode ser feito antes que se dê todo o trabalho com a MC, sendo possível, portanto, estabelecer um trabalho de articulação desses dois campos conceituais.

Tal trabalho pode contribuir para uma discussão mais profunda sobre os pressupostos dos modelos científicos, suas limitações e suas possibilidades (CLOUGH e OLSON, 2008). Uma pesquisa estruturada nessas bases pode, portanto, ser pertinente não só por investigar algumas formas de pensar dos estudantes, mas, também, por indicar possíveis articulações entre campos conceituais que tais estudantes podem fazer.

A partir desse quadro, surgiu a ideia de realizar a pesquisa sobre a construção da noção de tempo relativo por estudantes de ensino médio para investigar de que forma os modelos conceituais clássicos e relativísticos podem se complementar ou se rivalizar. O ambiente dessa pesquisa é a sala de aula, durante um processo de intervenção didática, organizado em torno da articulação entre os conceitos de duração, espaço e velocidade. A pesquisa deve envolver atividades de

¹ A situação escolhida para a discussão foi aquela relacionada ao chamado “paradoxo do espelho”. A partir dessa situação, é possível verificar que dois referenciais inerciais medem efeitos distintos para uma dada situação e, com isso, seria possível haver a distinção entre o repouso e o movimento retilíneo uniforme. Essa consequência é contrária aos fundamentos da MC.

resolução de problemas abertos², discussão coletiva e o uso de recursos audiovisuais para o ensino. Com isso, é possível avaliar as trajetórias seguidas pelos estudantes no processo de significação e como a noção de tempo relativo pode se tornar frutífera para a abordagem e a solução de situações-problema envolvendo a cinemática clássica e relativística.

1) Justificativa

O ensino de ciências da natureza tem sido realizado no Brasil, em geral, de uma forma por demais dogmática, onde regras, conceitos, leis, são apresentados de forma acrítica e sem conexão com os contextos que fomentaram as formulações.

Em particular, o ensino de Física carrega em si uma marca profundamente embasada nas formulações matemáticas (CARVALHO JR, 2002). Esse modelo de ensino contribui para a formação de uma mentalidade em que a Física escolar se presta, apenas, ao sucesso em exames escolares, centrados na manipulação algébrica de fórmulas e memorização de regras e enunciados.

As leis Físicas, nesse contexto, são apresentadas como verdades absolutas, válidas em qualquer contexto e os conceitos físicos ficam restritos à sua definição formal. Essa não consideração dos pressupostos de determinada teoria, dos contextos que deram margem para as construções teóricas e das situações que dão sentido aos conceitos são vetores para que os estudantes percebam a Física como o produto de um trabalho individual de poucos privilegiados.

Esse fato torna-se especialmente crítico quando se analisam noções que são estruturadoras do pensamento físico como força, energia, tempo e massa, por exemplo. Além disso, percebemos serem, ainda, escassas as discussões acerca dos limites de validade dos modelos da Física Clássica para que, com isso, seja dado espaço nos currículos para trabalhos relacionados com a produção científica mais recente.

² Utilizaremos o termo “problemas abertos” da mesma forma como entendido no domínio escolar, ou seja, como sendo itens discursivos de avaliação.

É bem verdade que se pode perceber, no ensino de Física, algumas tentativas de inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC)³ em sua base curricular. Esse fato pode ser verificado pelo aumento nas publicações sobre o assunto em revistas especializadas (ABDALLA, 2005; PEREIRA, PESSOA JR, CAVALCANTI e OSTERMANN, 2012) e na tentativa de autores de livros didáticos de inserir capítulos que abordem, por exemplo, tópicos de Física Quântica e de Teoria da Relatividade.

Em geral, essas tentativas se instauram na necessidade de uma maior atualização do ensino de Física, trazendo temas contemporâneos para as discussões nas salas de aula. Dessa forma, justifica-se a importância do ensino de FMC pela possibilidade de uma compreensão mais profunda sobre vários elementos da moderna tecnologia e das implicações dela para a cultura contemporânea.

Segundo Milner (1996) há três critérios que devem ser levados em conta para que certa disciplina seja incorporada ao currículo: (1) essa disciplina deve apresentar conceitos, habilidades, situações e relações que não serão apresentadas em outras disciplinas; (2) os saberes trabalhados não podem ser aprendidos em outras abordagens que não seja a instrução formal; (3) a aprendizagem dos conceitos e a construção das habilidades devem ser importantes e tenham algum valor para os estudantes.

Dessa forma, a inserção de elementos de FMC nos currículos da Educação Básica se justifica pelos três quesitos indicados por Milner. As relações conceituais e as situações que trazem significado aos conceitos apresentam especificidades, como a relatividade do espaço e do tempo ou a dualidade partícula-onda, por exemplo, que não são encontradas em outros componentes curriculares. As interpretações e os modelos utilizados pela FMC se distanciam fortemente do senso comum, o que torna difícil o aprendizado fora de um sistema formal de instrução. Além disso, a inserção dos sujeitos nas produções culturais da humanidade é algo relevante e justifica a importância e o valor do ensino de FMC.

No entanto, pode-se dizer que os critérios propostos por Milner, apesar de pertinentes, não abarcam a totalidade das justificativas de inserção de determinado

³ Não há um consenso sobre o significado do termo Física Moderna e Contemporânea. Nesta tese, o termo é utilizado como sendo a Física produzida a partir do século XX.

elemento em um currículo. Há, também, o necessário diálogo entre ciência e cultura e a compreensão sobre as formas de produção e validação do conhecimento científico, por exemplo.

A transição entre dois campos conceituais da MC e da FMC traz, em seu bojo, a discussão de limitações de modelos explicativos clássicos e, portanto, a necessária discussão do caráter provisório do conhecimento científico e dos domínios de validade dos seus campos conceituais. Essa percepção de ciência me parece fundamental para evitar as posturas dogmáticas sobre o conhecimento científico e por reforçar a ideia de que a ciência é um produto da atividade humana.

Em um exaustivo trabalho de revisão bibliográfica, Ostermann e Moreira (2001) identificaram três grandes correntes de pensamento sobre as formas de abordagem dos tópicos de FMC no Ensino Médio brasileiro: (1) exploração dos limites dos modelos clássicos; (2) não utilização de referências aos modelos clássicos; (3) escolha de tópicos essenciais.

A primeira corrente enfatiza que a abordagem em FMC deve ser conduzida a partir do estudo da Física Clássica, enfatizando os campos de validade dos modelos explicativos desta. Já a segunda corrente, que se opõe à primeira, afirma que as formas normais de pensamento apresentadas pela Física Clássica são potenciais obstáculos ao aprendizado da FMC e, por isso, devem ser evitadas em uma atividade didática. Essas duas correntes se rivalizam no sentido de que apresentam diferentes posturas didáticas em relação ao ensino de FMC.

A respeito dessas duas possibilidades de exploração didática, Vergnaud defende que, a princípio, elas podem ser pertinentes pois

o primeiro ato de mediação do ensino é, de fato, a escolha da situação a propor aos estudantes. Na ZDP⁴, existem continuidades e rupturas. O professor pode achar oportuno usar a continuidade e promover que o estudante passe de uma classe de situações a outra, próximas entre si (...). É também possível que o professor considere oportuno usar a ruptura, de maneira que provoque o desequilíbrio entre a situação a tratar e as competências dos estudantes, e fazer com que eles tomem consciência dos limites de seus pontos de vista. (VERGNAUD, 2007, p. 287 e 288)

⁴ Zona de Desenvolvimento Proximal, definida por Vigotski como sendo a diferença entre o que o sujeito consegue fazer sozinho e o que ele só consegue fazer com o auxílio do outro (VIGOSTKI, 2009). Esse conceito será tratado no capítulo 2.

Apesar de ser perceptível a tentativa de inserção dos temas de FMC na educação básica, há ainda alguns problemas que impedem a sua total aceitação por parte dos professores de Física. Trabalhando em um contexto mais reduzido – o do ensino de Física Quântica – e em outro país – a Argentina –, Fanaro, Arlego e Otero (2007) indicam algumas possíveis causas para isso: desconhecimento dos conceitos, a complexidade matemática envolvida, a má formação dos professores e as propostas dos livros textos.

Problemas como esses também são verificados no Brasil e representam dificuldades sérias para o estabelecimento de uma cultura de trabalho com a FMC. Além deles, pode-se citar, ainda, que os programas que devem ser cumpridos em cada série são muito extensos e não comportam o acréscimo de novos conteúdos, o que obriga o professor a fazer escolhas sobre quais conteúdos privilegiar. Em diversos momentos, porém, essas escolhas já foram feitas pelo sistema de ensino ao qual ele está vinculado.

Talvez por apresentar mais possibilidades de interação experimental e aplicações tecnológicas mais aparentes, verifica-se um maior número de pesquisas sobre a inserção de tópicos de Física Quântica no ensino médio (ARRUDA e FILHO, 2004; FANARO, ARLEGO e OTERO, 2007; FANARO, OTERO e MOREIRA, 2009). Essas pesquisas são direcionadas, de uma maneira geral, no desenvolvimento de atividades de intervenção didática que podem ser apresentadas aos estudantes no sentido de uma compreensão adequada de tópicos de conceitos relativos à Física Quântica.

Outros trabalhos se preocupam em analisar a maneira como a FMC é apresentada em livros didáticos existentes no mercado brasileiro (OSTERMANN e RICCI, 2004). Em geral, são apresentados aspectos associados aos modelos físicos envolvidos (como a relação massa-energia, a contração espacial e a dilatação temporal) e, a partir desses aspectos, os textos escritos são checados, buscando encontrar imperfeições/incorrecções que, segundo os autores da pesquisa, podem representar obstáculos ao aprendizado.

Arrigasecq e Greca (2006, 2012) apresentam resultados da condução de uma sequência de ensino contextualizada baseada na TRR. Para as autoras, as

noções de tempo e de espaço são essenciais nesse estudo e devem ser tematizadas no sentido de se evitar a atribuição errônea de seus significados dentro da TRR. O trabalho de 2006 focou mais intensamente a investigação sobre invariantes operatórios utilizados por estudantes e o de 2012 apresentou os resultados da aplicação da sequência de ensino como um todo. A conclusão geral é que, segundo o entendimento das autoras, é possível ensinar TRR no ensino médio, o que trás um ganho de compreensão mais profunda para os estudantes em relação não somente da teoria em si, mas da maneira com se produz e valida o conhecimento científico. Porém, ainda em relação às conclusões das autoras, a condução de um trabalho dessa forma pode não estar ao alcance de todos os professores, visto que exige um grande aprofundamento histórico e epistemológico por parte de quem planeja e conduz a sequência de ensino.

Uma possível resposta a essa necessidade começou a ser desenhada, em sua tese de doutorado, por Rezende Jr. (2006). O autor utilizou a teoria dos campos conceituais de Vergnaud para explorar a compreensão sobre a FMC em estudantes de licenciatura em Física na Universidade Federal de Santa Catarina. Nesse âmbito, o autor estuda os elementos essenciais – teóricos e metodológicos – para a formação de professores capazes de apresentar a FMC no ensino médio como um corpo de conhecimentos relevante para o diálogo com os modos de se validar o conhecimento científico e que possui estreita ligação com elementos da moderna tecnologia e que, por isso, interessa a todos, independente de eventuais estudos posteriores, em nível universitário, ou do campo de atuação profissional.

A partir de um referencial teórico que pretende ressignificar o movimento de mudança conceitual, o trabalho de Levrini e diSessa (2008) procura discutir a apropriação do conceito de tempo próprio por estudantes do colégio. Para isso, ao invés de investir no modelo clássico de mudança conceitual, os autores utilizam o conceito de classes de coordenação para classificar as formas de pensamento e os níveis de apropriação do conceito a partir de atividades de intervenção didática.

Uma abordagem mais geral sobre o tempo como um conceito foi feita por Martins (2007), que pesquisou como se estrutura tal conceito a partir de considerações ligadas à noção bachelardiana de perfil epistemológico. Nessa obra, o autor discute as diversas zonas do perfil de tempo, desde aquelas mais ligadas a

uma noção pessoal de tempo, com forte conotação egocêntrica, até formulações ligadas à noção moderna de tempo, seja na TRR ou na Física Quântica.

Em recente trabalho focado sobre a construção de um perfil conceitual para Referencial, Ayala Filho (2010), aborda o deslocamento do perfil de estudantes do ensino médio quando do estudo de mecânica clássica e da relatividade. O autor constrói as diferentes zonas do citado perfil que evoluem desde noções mais ligadas a uma visão egocêntrica até a uma mais relativista, além de identificar os pontos que podem ser possíveis obstáculos à compreensão do conceito científico de referencial.

Também explorando o conceito de perfil conceitual, Karan, Cruz e Coimbra (2006), estudam as condições para que seja possível implementar o estudo sobre a TRR no ensino médio brasileiro. Os autores buscam, mesmo que de forma inicial, um diálogo entre a teoria de equilíbrio de Piaget e alguns elementos da psicologia sociocultural de Vigotski para propor que seria interessante do ponto de vista didático que a FMC fosse apresentada ao longo dos três anos do ensino médio para que houvesse uma compreensão mais completa de conceitos-chave da Física.

Köhnlein & Peduzzi (2005) também procuram investigar as possibilidades de intervenção didática ligada à Teoria da Relatividade. Mas, o caminho escolhido foi o de uma discussão ligada à natureza da ciência e ao aspecto histórico ligado ao surgimento da TRR. Nesse sentido, os autores relatam uma interessante experiência de inserção desse campo conceitual em uma classe terminal do Ensino Médio em Santa Catarina a partir de um módulo didático escrito especialmente para esse fim.

Ainda nesse viés didático, Santos (2006) relata uma estratégia de apresentação e de discussão dos fenômenos da dilatação temporal e da contração espacial baseada em diagramas. O autor defende a ideia de que esses fenômenos são de difícil compreensão por parte dos estudantes e que a utilização de diagramas poderia ajuda-los na construção de representações e, com isso, facilitar o aprendizado.

Apesar de haver alguma produção acadêmica na área de ensino de FMC, percebe-se ser ainda limitada a quantidade de trabalhos que examinem a utilização, por parte dos estudantes, de noções chave da Física, tais como o tempo, a massa e a energia, em dois diferentes campos conceituais que não possuem uma filiação direta entre eles. Nesse contexto, percebe-se ser ainda necessário o

aprofundamento na investigação de como evoluem os conhecimentos que os estudantes necessitam utilizar em ação para dar conta da transição entre campos conceituais que se valham de diferentes estatutos epistemológicos para determinada noção⁵.

Nesse contexto, é relevante uma pesquisa que se proponha a avaliar se e como os sujeitos compreendem a transição entre a MC e a TRR e de que maneira são percebidos os pontos de tensão que motivaram, historicamente, o surgimento do novo modelo conceitual.

A TRR, por apresentar formulações ligadas à relatividade do espaço e do tempo, é vista como algo de difícil entendimento por parte dos estudantes. Como as noções do espaço e do tempo absolutos são pressupostos da MC e possuem referentes observáveis extraídos da experiência cotidiana⁶ no sentido de que os relógios permanecem sincronizados e as réguas continuam a medir os mesmos comprimentos a despeito das mudanças entre referenciais, a transição conceitual necessária para os modelos da TRR é entendida como árdua. Por isso, é necessária a investigação da forma como tal transição pode ser feita pelos estudantes.

Pesquisas organizadas nesse âmbito podem propiciar: (1) um espaço para a problematização da inserção significativa de tópicos da TRR no Ensino Médio; (2) uma descrição dos conceitos e teoremas em ação (VERGNAUD, 2007) utilizados pelos estudantes acerca das noções fundantes da TRR; (3) fornecer elementos mais gerais para o entendimento dos processos de formação de conceitos e de transições entre diferentes níveis de conceitualização científica.

Será, então, a MC um patamar necessário para a compreensão da TRR, sem o qual um dado sujeito não reconhece o modelo relativístico como uma possível fonte de desestabilização e, portanto, não conduz ao aprendizado desta? Ou, pelo contrário, os modelos e conceitos apresentados pela MC competem fortemente com

⁵ Por exemplo, a massa aparece como uma constante associada a um determinado corpo no âmbito da MC, mas como uma variável que depende da velocidade, quando analisada do ponto de vista da TRR. Mesmo que, do ponto de vista matemático, os resultados da TRR converjam aos da MC no limite de baixas velocidades, há uma diferença no estatuto epistemológico da noção de massa e do papel que ela cumpre no âmbito das duas teorias.

⁶ Alguns conceitos ligados à MC são, eles mesmos, contra intuitivos e de difícil aprendizagem como, por exemplo, o conceito de inércia. O que defendo aqui é que o nível de abstração necessário à compreensão da TRR é maior do que à MC. No entanto, esta última, mesmo mais ligada aos observáveis, ainda apresenta sérios obstáculos ontológicos à sua plena compreensão.

os da TRR a ponto de serem obstáculos ao aprendizado desta? A discussão da TRR a partir das limitações da MC poderia ser mais profícua para a construção, por parte dos estudantes de uma visão mais globalizante sobre a ciência e por isso, deveria ser estimulada?

Em uma pesquisa conduzida a partir de uma sugestão de Einstein, Piaget (1973/1946, p. 22) chega a afirmar que

tant que l'idée de vitesse n'est pas acquise sous une forme opératoire, c'est-à-dire comme un rapport entre l'espace parcouru et cette dimension commune aux différentes vitesses qui est précisément le temps, l'ordre temporel se confond avec l'ordre spatial et la durée avec le chemin parcouru. Inversement, tant que l'ordre temporel n'est pas lui-même constitué, la vitesse se réduit à une intuition insuffisante et parfois trompeuse, celle du dépassement, c'est-à-dire à nouveau d'une intuition spatiale, caractérisée par le changement de position respective des mobiles. La construction du temps commence donc quand les vitesses différentes sont comparées entre elles.⁷

Ora, essa noção de tempo está fortemente ligada aos fenômenos cotidianos que podem ser observados pelo sujeito e no uso social de tal noção. Isso conduz à conclusão de que a construção da noção de tempo físico pelos sujeitos está mais fortemente ligada a uma noção de tempo absoluto, uniforme e universal. Ao discutir os limites de validade de tal construção, o ensino da TRR pode contribuir para que os estudantes passem a ter uma visão da ciência como um construto humano, onde o estatuto epistemológico do conhecimento é provisório e ligado aos princípios de cada modelo teórico em particular.

A TRR é um campo conceitual que rompe com diversos pressupostos da MC, como o caráter absoluto do espaço, do tempo e da massa. A investigação conduzida na fronteira entre esses dois campos pode ser, portanto, frutífera por

⁷ À medida que a ideia de velocidade não é obtida de uma forma operatória, isto é, como uma razão entre a distância percorrida e este aspecto comum a diferentes velocidades que é precisamente o tempo, a ordem temporal é confundida com a ordem espacial e duração do caminho percorrido. Por outro lado, como a ordem temporal não é por si só o produto, a velocidade é reduzida a uma intuição inadequada e, por vezes enganosa, à da ultrapassagem, isto é, mais uma vez uma intuição espacial, caracterizado pela mudança respectiva posição do móvel. A construção do tempo começa quando as velocidades diferentes são comparadas umas com as outras. (tradução nossa)

revelar formas de pensar e de agir dos estudantes em situações que exigem um alto nível de abstração.

Por se tratar de uma teoria complexa e multifacetada, é necessário que se façam recortes no objeto, no sentido de se investigar o aspecto ligado à elaboração do tempo relativo. Esse recorte é possível por diversas razões, dentre as quais se destacam duas. Em primeiro lugar, a construção do tempo relativo no âmbito da TRR é uma previsão teórica conduzida a partir dos postulados e, como tal, possui o mesmo estatuto epistemológico de outros efeitos como a contração espacial. Em segundo lugar, como indica Balibar (2001), a noção de tempo absoluto possui um estatuto ontológico mais forte do que as outras noções tratadas na TRR, uma vez que tal noção é considerada como absoluta em dois sentidos: (1) como uma grandeza que não interage com qualquer outra e (2) como uma grandeza cuja medida não depende do referencial utilizado.

Portanto, a transição entre as noções de tempo físico nos dois campos conceituais fornece mais elementos de análise para esta pesquisa e necessita de uma articulação entre o tempo, espaço e velocidade. Fixando o foco da análise na noção de tempo, pode-se, portanto, construir um instrumento de pesquisa que resgate os conceitos chave da MC ligados ao movimento (referencial, espaço, velocidade) e que parta deles para investigar o papel que cumprem na construção das relações conceituais da TRR.

É em termos dessa necessidade de ligação entre diversos conceitos que o problema de pesquisa será formulado a seguir.

2) Formulação do Problema de Pesquisa

A noção de tempo, da forma como é concebida no âmbito da MC, apresenta o estatuto epistemológico de uma grandeza absoluta, conforme apresentado pelo próprio Isaac Newton, ao afirmar que “o tempo absoluto, verdadeiro e matemático flui sempre igual por si mesmo e por sua natureza, sem relação com qualquer coisa externa” (NEWTON, 1983, p. 8). Nesse contexto, o intervalo de tempo de ocorrência de qualquer evento pode ser medido a partir de qualquer referencial sem que se afete o resultado medido.

Já no âmbito da TRR, os intervalos de tempo são tidos como entidades relativas, onde sua medida depende do referencial utilizado. Essa relatividade das durações dos eventos é concebida como uma consequência do caráter absoluto que adquire a velocidade da luz no âmbito dessa teoria. Assim, para a TRR, dois referenciais distintos podem medir diferentes intervalos de tempo para a ocorrência de certo fenômeno (o decaimento radioativo, por exemplo) e encontrar valores distintos, sem que seja conferido a um deles o *status* de verdade e, ao outro, algum erro de medida. Nas palavras de Einstein:

se nos pontos A e B de [de um referencial] K há relógios parados os quais, vistos em um sistema estacionário, são síncronos; e se o relógio A é movido com velocidade v ao longo da linha AB para B, então na sua chegada em B os dois relógios não estarão mais sincronizados, mas o relógio que se moveu de A para B se atrasa em relação ao que permaneceu em B por um fator $(\frac{1}{2}).t.v^2/c^2$, sendo t o tempo gasto no movimento de A para B. (EINSTEIN, 2011. p.10)

Tal formulação é, na TRR, uma consequência dos postulados formulados por Einstein. Apresentada dessa forma, a relatividade das durações de tempo poderia ser reconhecida pelos estudantes como uma formulação dogmática, visto que não estão colocados o contexto e as situações que contribuíram para a sua constituição.

No entanto, a TRR foi concebida no contexto da necessidade de se para explicar as incompatibilidades entre os domínios da MC e do Eletromagnetismo⁸. A construção de uma visão globalizante sobre a Física e a compreensão do caráter provisório do conhecimento passa pela explicitação dos problemas que levaram à elaboração de novas teorias. Nesse âmbito, a apresentação do cenário científico que culminou na TRR é essencial para dar significado às situações de ensino nessa área⁹. Portanto, optaremos, nesta pesquisa, pela posição didática de explorar a TRR

⁸ Dentre as várias formas de apresentar esse problema, Einstein discute a “aparente incompatibilidade entre a lei da propagação da luz e o princípio da relatividade” da MC (EINSTEIN, 2009, p.22). Essa formulação coloca em xeque a forma como as velocidades são compostas pela MC e a maneira como o Eletromagnetismo concebe a propagação da luz. Outro problema relevante é a aparente quebra de simetria na troca de referenciais quando se analisam os campos elétricos e magnéticos gerados por cargas elétricas em movimento.

⁹ Essa discussão está ligada ao problema da natureza da ciência e sua influência no aprendizado por parte dos sujeitos. Utilizamos, como referência, a visão de ciência como uma construção humana, cujas verdades são provisórias, ligadas a determinados sistemas de significação e de validação dos saberes (LEDERMAN, 2007).

a partir da exploração dos limites da MC por acreditarmos que esse tipo de abordagem pode fornecer um contexto mais amplo para que os sujeitos possam colocar em perspectiva os dois campos conceituais.

Mesmo assim, a transição entre as noções de tempo físico absoluto para o relativo não é de fácil execução, visto que exige dos sujeitos um intenso processo de abstração. Isso deve-se, principalmente, ao fato de que essa noção relativa não possui referência em situações cotidianas e choca-se fortemente com as concepções dos sujeitos. No entanto, ela pode ser conseguida, por exemplo, a partir da verificação da necessária reorganização dos fundamentos da MC, visto que esta não é compatível com formulações ligadas ao Eletromagnetismo.

Em face dessa situação, o problema de pesquisa é formulado no sentido de investigar como se dá a transição entre as noções de tempo físico absoluto e relativo por parte de estudantes do Ensino Médio, quando eles devem enfrentar situações nas quais são necessários elementos da TRR.

Por isso, a pergunta central dessa pesquisa pode ser formulada nos seguintes termos: de que maneira os estudantes organizam seus conhecimentos-em-ação para construir a noção de tempo relativo e como utilizam essa noção para reconhecer as situações onde ela é necessária e resolver os problemas apresentados?

Para responder à questão central da pesquisa, foram necessários (1) a construção de uma sequência didática orientada para apresentar os limites da MC e sua inconsistência com o Eletromagnetismo para, a partir desse ponto de tensão, discutir a TRR e suas consequências e (2) a investigação, em ação, de como os estudantes pesquisados se organizam para dar conta dessa transição. Nessa análise, foram investigadas as alterações estruturais e funcionais dos invariantes operatórios (VERGNAUD, 1990) utilizados pelos sujeitos ao longo das atividades a partir da caracterização das suas trajetórias cognitivas.

3) Objetivos

3.1) Geral

Analisar as alterações promovidas nos conhecimentos em ação utilizados pelos estudantes ao longo do processo de transição entre os campos conceituais da MC e da TRR, sobretudo no que diz respeito à noção de tempo relativo.

3.2) Específicos

- I. Caracterizar as trajetórias cognitivas dos estudantes a partir da investigação dos conceitos-em-ação e dos teoremas-em-ação utilizados para dar conta de situações onde era necessária a articulação entre as noções de referencial, deslocamento, velocidade e tempo.
- II. Identificar os modos de transição das formas de pensar e agir de estudantes de ensino médio quando confrontados com as noções de tempo físico absoluto e relativo.
- III. Identificar os conhecimentos em ação utilizados pelos estudantes na abordagem de situações envolvendo o tempo físico.
- IV. Analisar as contribuições da TCC como referencial teórico para demarcar trajetórias de aprendizagem na aprendizagem de Física da natureza em ambiente escolar.

4) Estrutura do Texto

Pelo fato dessa tese apresentar uma pesquisa feita sobre a transição entre as noções de tempo absoluto e relativo, será apresentado, no primeiro capítulo, alguns aspectos ligados ao tempo. Assim, serão discutidos, em um primeiro momento, os trabalhos da Escola de Genebra sobre a noção de tempo, assim como outras pesquisas que discutem o tempo como um conceito. Em seguida, discutimos as concepções sobre o tempo dentro da MC e da TRR.

O segundo capítulo é destinado à apresentação da Teoria dos Campos Conceituais (TCC) – o referencial teórico desta pesquisa – e as apropriações que foram feitas desta teoria para uma pesquisa sobre a evolução de conceitos físicos em sala de aula. Nesse capítulo, há, ainda, a apresentação do diálogo que a Teoria dos Campos Conceituais pode exercer com alguns aspectos dos construtos teóricos da psicologia genética e da psicologia sociocultural.

A apresentação do desenho da pesquisa, da caracterização dos espaços e dos sujeitos participantes é feita no terceiro capítulo. Nele, são indicados e justificados os processos seguidos, desde a chegada do pesquisador ao ambiente da sala de aula até as formas de construção dos dados. Como essa construção foi feita em estreita conexão com um processo de intervenção didática, neste capítulo serão apresentadas, também, a descrição de cada aula e as análises das interações discursivas, das produções dos estudantes e da maneira como estes significaram cada uma atividades.

No quarto capítulo são construídas as trajetórias cognitivas de cinco dos estudantes, procurando construir uma narrativa que permita abordar os problemas de pesquisa já apresentados.

A conclusão desta tese apresenta os achados mais significativos e as possíveis contribuições para o ensino de Física, para outras possíveis pesquisas e para a utilização da TCC como referencial teórico no âmbito do ensino de ciências. Além disso, são indicados alguns dos pontos que, apesar de extrema importância, não foi possível a exploração, seja teórica ou empírica, no âmbito desta pesquisa.

CAPÍTULO 1 – O TEMPO

“Pois quando eu era um bebê e chorava e dormia,
O tempo se arrastava,
Quando eu era menino e ria e falava,
O tempo andava;
Quando os anos fizeram de mim um homem,
O tempo correu,
Mas quando fiquei velho, o tempo voou.”
Guy Pentreath

1.1) Introdução

A noção de tempo escapa a toda e qualquer definição genérica. O francês Blaise Pascal, em sua obra “Do espírito geométrico”, já apresentava essa questão central.

Qui pourra définir le temps? Et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant de temps, sans qu'on le désigne davantage? Cependant il y a bien de différentes opinions touchant l'essence du temps. Les uns disent que c'est le mouvement d'une chose créée ; les autres, la mesure du mouvement, etc.¹⁰ (PASCAL, 2001, p. 9)

O tempo permeia nossa vida cotidiana e está presente em diversas manifestações culturais como, por exemplo, em livros, filmes, quadros, etc. Por seus mitos, seus calendários, suas festas regulares ou ocasionais, cada sociedade se esforça para conceber uma maneira de dar vazão à necessidade humana de sublimar o fluxo contínuo e irreversível do tempo (JEQUIER, 1991, p. 17).

Talvez a primeira noção de um fluxo do tempo esteja ligada ao caráter cíclico dos fenômenos naturais (sucessão entre dia e noite; fases da Lua; posição das constelações no céu em função da estação do ano, etc.). Em um passado muito remoto, essa sucessão de padrões no céu era de extrema importância para que as populações reconhecessem os períodos de seca, chuva, plantio e colheita. As sociedades contemporâneas não necessitam mais de reconhecer no céu esses

¹⁰ Quem poderá definir o tempo? E porque realiza-lo, uma vez que todos os homens concebem o que se quer dizer ao falar do tempo, sem que se defina melhor? No entanto, há bastante diferentes opiniões que tocam a essência do tempo. Uns dizem que é o movimento de uma coisa criada; outros, a medida do movimento, etc.

padrões, mas as consequências dessas ações ainda estão presentes, por exemplo, na atribuição dos signos do zodíaco. É de se esperar que, sendo algo de tão fundamental importância para a vida das pessoas, a noção do fluxo do tempo fosse registrada nas mais diversas formas de representações culturais.

Em um contexto muito mais restrito, a partir de uma perspectiva científica, o tempo aparece na cinemática como uma variável independente para a descrição dos movimentos. Nesse sentido, ele é tratado, dentro da MC, como uma espécie de pano de fundo, onde as ações ocorrem de maneira linear. Nessa perspectiva, usualmente não se faz qualquer discussão sobre a natureza do tempo. O tempo é apenas uma variável independente mediante a qual registramos os eventos.

Somente com o advento da Termodinâmica, com o desenvolvimento do conceito de Entropia, é que o fluxo do tempo passou a ser objeto de estudo de forma mais sistematizada. Nesse campo conceitual, encontramos elementos para que haja uma melhor compreensão sobre o sentido único do fluxo do tempo. Mais tarde, com a emergência da TRR, tempo, espaço e velocidade foram integrados e, dessa forma, o tempo deixou de ser uma variável independente.

Esse capítulo tem por objetivo apresentar algumas questões importantes sobre a noção de tempo. Em um primeiro momento, apresento alguns trabalhos que discutem, direta ou indiretamente, aspectos ligados ao tempo. Nessa seção serão discutidas algumas referências que serviram de base, seja para o planejamento desta pesquisa, seja para a análise dos dados obtidos. Em seguida, discuto a utilização física do tempo, sua medida e a maneira como ocorreu a mudança de estatuto epistemológico quando da emergência da TRR.

Não temos a intenção de realizar um tratado sobre o tempo, o que julgamos estar além dos objetivos deste trabalho, mas de discutir os aspectos essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2) Trabalhos importantes sobre a formação da noção de tempo

Para a construção dos instrumentos de pesquisa, da própria sequência de didática e para a construção e análise dos dados, foram levados em consideração alguns trabalhos que exploram, de diferentes formas e a partir de referenciais teóricos distintos, a noção de tempo.

Para outras formas de concepção, o tempo é considerado um *schème*¹¹ que organiza uma série de condutas e de operações ligadas às situações que envolvem a duração de eventos, a análise de movimentos, as questões ligadas à simultaneidade e às velocidades e, por isso, também permite o estabelecimento de relação entre diversos conceitos.

Para alguns pesquisadores (MARTINS, 2007; SILVA JR, TENÓRIO e BASTOS, 2007), o tempo deve ser considerado um conceito que, como tal, possui uma rede de significação e de ligação a outros conceitos e às situações. Além disso, como conceito, o tempo possuiria faixas bem delimitadas de compreensão que poderiam representar um Perfil Epistemológico ou um Perfil Conceitual para esse conceito.

Por fim, ainda há certas atribuições do tempo como uma representação ou uma espécie de imagem mental, construída a partir das diversas sensações temporais que se desenvolvem desde as mais tenras idades em ambientes culturais específicos e em épocas bem determinadas.

Essas concepções serão apresentadas e discutidas no sentido de se construir uma base teórica acerca dos fenômenos que serão estudados nessa pesquisa.

1.2.1) A noção de tempo como um *schème*

A primeira das posições teóricas está relacionada com a produção da escola de Genebra sobre a noção de tempo. São várias as obras que exploram essa noção e diversos os aspectos estudados. Três obras, em particular, apresentam elementos importantes para o interesse aqui em foco.

A primeira obra foi a pesquisa realizada por Piaget, a partir de uma sugestão de Einstein, que está sintetizada em "*Le développement de la notion de temps chez l'enfant*" (PIAGET, 1973/1946). A segunda obra representa a consolidação de um conjunto de pesquisas sobre o tempo sob os números XX e XXI do anuário dos estudos sobre epistemologia genética (EEG), que receberam, respectivamente, os nomes de "*L'épistémologie du temps*" (PIAGET, 1966) e "*Perception et notion de*

¹¹ Apesar de haver uma palavra em português – esquema – fiz opção pelo original em francês para que não haja confusão conceitual. O *schème*, em Piaget e Vergnaud, refere-se à organização da atividade frente a uma dada classe de situações e será discutido em uma seção específica desse capítulo. "Esquema", ou *schème* (no francês) pode ser confundido com um desenho, um esboço ou uma representação primeira, não bem desenvolvida, de uma coisa ou ideia.

temps” (PIAGET, 1967c). A terceira, bem mais recente, foi um estudo sobre a correlação entre a noção de tempo e a causalidade em crianças, conduzida por Ducret, Saada e Janet (2008). Apesar de não ser um trabalho realizado por Piaget, ele possui uma orientação fortemente piagetiana, em grande parte pela presença de Jean-Jacques Ducret, presidente da Fundação Jean Piaget de Genebra e eminente piagetiano. Essa pesquisa foi realizada no âmbito do departamento de instrução do cantão¹² de Genebra e apresenta conclusões muito próximas dos estudos realizados por Piaget.

O nosso interesse central nesses trabalhos foi o de resgatar a maneira pela qual foi investigada a noção de tempo e seus pressupostos. Não focamos, portanto, no estabelecimento de níveis ou de estágios, tônica dos interesses piagetianos do período que se estende da década de 1940 à de 1960, período esse classificado de estruturalista por Parrat-Dayan (2012 e 2013). Pelo contrário, nosso interesse foi direcionado para a discussão ligada aos processos operatórios sobre o tempo. Essa opção deveu-se à necessidade de pesquisar a noção de tempo já em adolescentes e, não, sobre a maneira como tal noção se constitui ao longo do desenvolvimento do sujeito.

A questão central do primeiro trabalho é a investigação se “l’intuition subjective du temps, est-elle primitive ou dérivée, et d’emblée solidaire, ou non, de celle de la vitesse”¹³ (PIAGET, 1973/1946, p. 2). Assim, Piaget pretende investigar se a noção de tempo é uma entidade própria, independente dos conceitos de espaço e velocidade e, de certa forma, blindada de influências culturais. Ou, se ao contrário, essa noção é construída em coordenação com as noções de espaço e/ou velocidade.

Nesse sentido, Piaget já apresenta, desde o início da obra, sua posição acerca dessa pergunta, afirmando que

Le temps est la coordination des mouvements: qu’il s’agisse des déplacements physiques ou mouvements dans l’espace, ou de ces mouvements internes que sont les actions simplement esquissées,

¹² A Suíça é uma Confederação que reúne 23 unidades administrativas autônomas, cada uma delas é chamada de cantão. O cantão de Genebra engloba diversas pequenas cidades, cuja capital é a cidade de Genebra.

¹³ “A intuição subjetiva do tempo é primitiva ou derivada e, desde o início, solidária ou não à noção de velocidade?” (tradução nossa)

anticipées ou reconstituées par la mémoire, mais dont l'aboutissement est lui aussi spatial, le temps joue à leur égard le même rôle que l'espace à l'égard des objets immobiles.¹⁴ (PIAGET, 1973/1946, p. 2)

Nessa mesma linha de pensamento, Piaget ainda afirma que, como o tempo é ligado às coisas que, ou não existem mais ou não existem ainda (exceto por uma pequena zona móvel que se chama presente), há uma grande dificuldade de colocar a problemática do tempo em termos de conservação e, por isso, tanto o tempo físico quanto o psicológico trazem problemas significativos para a construção de referenciais para uma pesquisa baseada na epistemologia genética, listados a seguir.

- A) As operações temporais constituem o ponto de chegada das regulações próprias às condutas pré-operatórias (estas permanecendo também em todos os níveis no campo da percepção ou do tempo vivido) ;
- B) As operações temporais aparecem, então, como o produto do estabelecimento de uma relação progressiva entre índices A (como, por exemplo, o espaço) e índices B (como a velocidade). Pode-se escrever essa relação sobre a forma de uma relação $t = A/B$, sem que este implique de início uma métrica, mas porque o sujeito vai, cedo ou tarde, inverter a relação entre o tempo e a velocidade ;
- C) As flutuações ou erros próprios às estimações pré-operatórias podem ser explicadas pelo fato de o sujeito superestimar ou negligenciar um dos termos da relação (PIAGET, 1966, p. 54).

Para Piaget, as operações temporais derivam das condutas pré-operatórias e o tempo não é outra coisa que a organização desse conjunto de operações. Mas o tempo não se reduz a uma relação simples. Ele mostra uma multiplicidade de funções progressivamente coordenadas e engloba, pouco a pouco, a velocidade

¹⁴ “O tempo é a coordenação dos movimentos: que se trate de deslocamentos clássicos ou movimentos no espaço, ou dos movimentos internos que são as ações simplesmente esboçadas, antecipadas ou reconstituídas pela memória, mas às quais o resultado é também espacial, o tempo desempenha da sua parte a mesma função que o espaço com relação aos objetos imóveis.” (tradução nossa)

como função inversa, no sentido de que quanto mais rápido um movimento, menor o tempo necessário para que ele ocorra (PIAGET, 1966, p. 55)¹⁵.

As conclusões mais significativas desses trabalhos apontam para o fato de que não se pode falar sobre uma noção de tempo como dissociada das situações e de outros conceitos, principalmente do conceito de velocidade. Piaget afirma haver um *tempo operatório*, associado aos intervalos de tempo e à noção de sucessão. Esse tempo desenvolve-se de maneira análoga às operações lógicas e está em estreita conexão com a noção de velocidade.

Sobre essa relação entre tempo e velocidade, o autor ainda afirma que

la construction du temps commence donc quand les vitesses différentes sont comparées entre elles, vitesses des activités humaines comme des mouvements matériels, et cette construction s'achève avec la coordination de ces vitesses: les notions de temps et de vitesse sont donc corrélatives.¹⁶ (PIAGET, 1973/1946, p. 269)

Ao afirmar isso, Piaget conduz sua argumentação para concluir que o tempo é um *schème*, que vai se formando e se diferenciando ao longo do desenvolvimento do sujeito a partir do enfrentamento das diversas situações a que um sujeito fica exposto. Essa é uma posição que confere ao tempo uma natureza operatória de grande relevância, pois abriga sobre ela um conjunto de conceitos, de relações e de modos de ação para a classe de situações que envolvem noções temporais.

Inicialmente, até cerca de 2 anos de idade, período chamado por Piaget de sensório-motor,

le temps est un temps local au double sens d'un temps non general, mais variant d'un mouvement à l'autre et d'un temps se confondant avec l'ordre spacial propre à chaque déplacement dans le sens positif du parcours¹⁷. (PIAGET, 1973/1946, p. 273)

¹⁵ Nos dois volumes dos EEG citados, a interpretação das pesquisas conduzidas em crianças muito jovens revela que a primeira relação estabelecida entre tempo e velocidade é direta, ou seja, crianças no período pré-operatório tendem a estabelecer a noção de que quanto mais rápido, maior o tempo gasto.

¹⁶ A construção do tempo começa, então, quando as velocidades diferentes são comparadas entre si, velocidades das atividades humanas como movimentos materiais, e esta construção se consolida com a coordenação de tais velocidades: as noções de tempo e de velocidade são, então, correlatas. (tradução nossa)

¹⁷ O tempo é um tempo local no duplo sentido de um tempo não geral, mas que varia de um movimento ao outro e de um tempo que se confronta com a ordem espacial própria a cada deslocamento no sentido positivo do percurso. (tradução nossa)

Essa localidade da noção de tempo e sua ligação às noções espaciais é uma manifestação do egocentrismo infantil¹⁸, já que a criança não consegue coordenar diferentes velocidades por não ser capaz de religar diferentes pontos de vista simultaneamente. Por não ter consciência da diferenciação entre si mesma e os outros, a criança também não consegue estabelecer relações entre as velocidades e os fluxos de tempo que seriam “externos” a ela. Essa conclusão, em Piaget, é válida para o tempo dito físico ou o psicológico.

Porém, a partir do momento em que a criança consegue conduzir operações, no sentido de ações reversíveis, o tempo como *schème* torna-se capaz de transcender o fluxo corrente dos eventos e, dessa forma, estabelecer a relação com a velocidade. Dessa forma, Piaget (1973/1946, p. 275) afirma que há um “temps rationnel ou système de opérations constituant la notion du temps”¹⁹.

Essa afirmação deve ser analisada com muito cuidado, porque Piaget coloca acento sobre uma diferenciação central. O tempo, para o autor,

n'est pas un concept (...) mais un schème unique, c'est-à-dire une forme d'ensemble commune à tous les objets ou, si l'on veut, un objet formel ou une structure²⁰. (PIAGET, 1973/1946, 293)

Dessa forma, Piaget conclui sua pesquisa dizendo que o tempo não pertence à categoria das “*formas a priori da sensibilidade*” como pensava Kant. Pelo contrário, é necessário, como ocorre na constituição de todo *schème*, que se desenvolvam as estruturas de reversibilidade para que ele possa agir em plenitude.

Por fim, Piaget discute brevemente a possibilidade de ampliar suas conclusões para o domínio relativístico. Nesse sentido, ele afirma que

le temps relativiste n'est donc qu'une extension aux grandes vitesses, et au cas particulier de la vitesse relative de la lumière, d'un principe valable dès les stades les plus humbles de la formation du

¹⁸ Piaget apresenta a noção de egocentrismo logo em seus primeiros livros, onde ele coloca o pensamento egocêntrico, típico de crianças, como sendo um meio termo entre o pensamento autista – totalmente voltado para si mesmo e o pensamento socializado. Essa noção está relacionada a uma forma particular de interpretar o mundo a partir do seu próprio ponto de vista, sendo que, dessa forma, não existe, na criança, a consideração de outros pontos de vista. A partir do processo de descentração a criança vai diminuindo a intensidade de seu egocentrismo.

¹⁹ Tempo racional ou sistema de operações que constituem a noção do tempo. (tradução nossa)

²⁰ Não é um conceito mas um *schème* único, ou seja, uma forma de conjunto comum a todos os objetos ou, se se quer, um objeto formal ou uma estrutura. (tradução nossa)

temps physique et psychologique, dès la genèse du temps chez le petit enfant²¹. (PIAGET, 1973/1946, p. 298)

Considerar o tempo como um *schème* que possui uma história de desenvolvimento e que funciona articulando, dentro de uma classe de situações, os conceitos de velocidade e de espaço é uma posição metodológica adequada para uma pesquisa – como esta – que se propõe a investigar os invariantes operatórios utilizados por sujeitos que tentam compreender a relatividade de intervalos temporais.

Isso se deve, principalmente, ao fato de que essa compreensão exige não somente o conhecimento de teorias Físicas, mas de um elemento que organize a tomada de dados e a construção de relações entre eles. Esse elemento de organização da ação para a classe das situações que, de alguma forma, estão relacionadas às noções temporais (deslocamento, velocidade, duração de eventos, simultaneidade, etc.) é o que pode ser entendido como *schème* de tempo. Voltaremos a essa ideia na seção sobre *schème* no capítulo seguinte.

As críticas existentes atualmente sobre esse trabalho de Piaget são colocadas em diversos pontos e foram muito bem sumarizadas por Roazzi & Castro Filho (2001). É possível perceber, nessas críticas, tanto posicionamentos contrários ao método experimental utilizado por Piaget quanto questionamentos sobre a generalidade das conclusões. Mas, em nenhum dos trabalhos citados pelos autores houve o questionamento da noção de tempo como um *schème*.

1.2.2) A noção de tempo como um conceito

Em seu trabalho sobre a constituição do tempo físico, Martins (2007) considerou o tempo como um conceito e teve como objetivo compreender como os estudantes dos ensinos fundamental e médio constroem tal conceito. O contexto da pesquisa de Martins é mais restrito do que o que fez a escola de Genebra, uma vez que ele investigou somente a construção do conceito de tempo físico.

A referência teórica do trabalho foi a Epistemologia de Bachelard, onde o autor aprofunda a noção de Perfil Epistemológico para o tempo. A pesquisa de

²¹ O tempo relativístico é, somente, então uma extensão a grandes velocidades, e, no caso particular da velocidade relativa da luz, de um princípio válido desde os estágios mais primitivos da formação do tempo físico e psicológico, desde a gênese do tempo em crianças muito jovens. (tradução nossa)

Martins é notável no que diz respeito à profundidade da abordagem conceitual e da análise histórica das noções de tempo. Nesse sentido, o autor estabeleceu uma cronologia das concepções sobre o tempo desde os gregos até os estudos sobre a teoria da relatividade e a Física quântica no sentido de se identificar as zonas do perfil epistemológico para o conceito considerado.

A proposta de Martins era estabelecer tal perfil epistemológico e ele o fez apoiando-se em quatro diferentes zonas, que são, grosso modo, tanto as categorias que podem acessar os sujeitos quando da resolução de problemas quanto categorias indicativas de um paradigma do pensamento científico em diversas eras da história das ciências. Essas categorias são: o *realismo ingênuo* (noção subjetiva de tempo e marcada pelo egocentrismo), o *empirismo* (o tempo como uma grandeza passível de medição de forma unívoca), o *racionalismo tradicional* (o tempo como um parâmetro matemático abstrato) e o *surracionalismo* (a visão moderna sobre o tempo).

Um dos pontos que o trabalho de Martins acrescenta à discussão sobre o tempo é a possibilidade de se estabelecerem paralelos entre o desenvolvimento histórico e pessoal das concepções sobre o tempo (MARTINS, 2007, p. 246). Nesse sentido, o autor trabalha com o conceito de tempo em uma perspectiva cultural que Piaget e a escola de Genebra não haviam feito.

Algumas das conclusões desse trabalho se aproximam daquelas obtidas por Piaget nos trabalhos citados anteriormente. Ou seja, há uma rota genética para a construção da noção de tempo que se faz pela coordenação entre as outras noções importantes de espaço e velocidade. Além disso, as categorias apresentadas por Martins revelam um crescimento progressivo no nível de abstração, em que cada categoria, de certa forma, engloba a(s) anterior(es) em um processo recursivo de significação.

O autor concluiu seu trabalho com algumas indicações de possibilidades de novas investigações sobre esse tema. Além de citar questões ligadas à ampliação do universo de pesquisados e da abrangência das atividades de investigação, Martins defende a ideia de utilização do referencial bachelardiano em outras incursões como, por exemplo, para explorar a relação entre o perfil e a cultura. Por fim, ele indica a possibilidade de novas investigações sobre outros conceitos como a velocidade e a aceleração.

Em outro trabalho, Silva Junior, Tenório e Bastos (2007) também utilizaram o referencial bachelardiano dos perfis epistemológicos para caracterizar o conceito de tempo. No entanto, o foco do trabalho desses autores difere daquele apresentado por Martins. Para esses autores, a preocupação era a de estudar o tempo dentro de um contexto ligado às representações sociais, ligado ao trabalho de Serge Moscovici e, portanto, um pouco mais afastado do interesse em se estudar o tempo como variável física ligada aos movimentos.

Consideramos que a relevância dessas pesquisas está em abordar, do ponto de vista da construção de conceitos, as formas de compreensão sobre o tempo (físico, social, etc.). O estudo realizado por Martins com várias faixas etárias distintas permite não só a identificação das zonas do perfil epistemológico de cada estudante, mas também a análise de um desenvolvimento ontogenético e filogenético da noção de tempo. Essa análise nos foi útil em diversos momentos da pesquisa, sobretudo, no desenho das atividades de pesquisa, pois o reconhecimento das diversas formas de compreensão e de utilização do tempo implica na possibilidade do desenho de situações mais amplas que permitam investigar de que forma os conceitos envolvidos estão organizados.

No entanto, afastamo-nos da perspectiva teórica e metodológica de Martins na medida em que o interesse de pesquisa era outro. Reconhecemos a relevância desse referencial teórico, mas não utilizamos essa abordagem porque nossa preocupação era a de investigar de que maneira os estudantes organizam sua ação a partir da mobilização de seus conhecimentos em certas atividades. Nesse sentido, a utilização do tempo como um *schème* que organiza as ações do sujeito e que funciona de maneira solidária ao de movimento nos pareceu mais adequada para a análise do sujeito em situação e, também por isso, ocorreu nossa filiação à TCC.

O tempo físico como um conceito ainda foi estudado em Balibar (1988), Einstein (2009), Einstein & Infeld (2008), Menezes (2005) e Whitrow (1993). Nessas obras, há uma discussão mais centrada no tempo físico como uma variável ligada ao movimento. Nesse sentido, é possível estabelecer a forma como ocorreu a mudança de estatuto epistemológico para o tempo da MC para a TRR.

A importância dessas obras para esta pesquisa foi a de permitir uma melhor compreensão dos fundamentos que nortearam o desenvolvimento da MC em um momento crucial da história das ciências. Esse fato contribuiu para a escolha das

atividades a serem propostas aos estudantes e na organização dos textos da sequência didática que deu suporte às atividades de pesquisa.

1.2.3) A noção de tempo como uma representação

Uma terceira obra utilizada, de natureza diferente das duas anteriores, é uma coletânea de textos que versam sobre o tempo, intitulada “*Le temps et ses représentations*”, organizada por Bernard Piettre (2001). Produzida a partir de uma série de conferências realizadas sobre a temática do tempo, esse livro apresenta o diferencial de mostrar as diversas maneiras de abordar a noção sobre o tempo, desde aquelas mais ligadas à metrologia, até as que se valem de construtos da Relatividade, passando pelas noções de tempo cotidiano, nas artes e na política.

Esse livro é dividido em duas partes. A primeira delas é dedicada ao tempo físico e apresenta três capítulos. O primeiro capítulo mostra questões ligadas à medida do tempo que foram, em parte, utilizadas no desenvolvimento da próxima seção deste capítulo da tese. Essa preocupação em se medir o tempo tem diversas origens e objetivos. Em uma sociedade tecnológica e globalizada como a nossa, tal preocupação em se produzirem medidas mais precisas e confiáveis é cada vez mais intensa. Por isso, o espaço dedicado no livro a essas questões. As noções ligadas ao tempo relativístico estão apresentadas e discutidas no segundo capítulo. Nele, a partir dos trabalhos de Françoise Balibar e Michel Paty, são discutidas as transições da MC para a TRR no que se refere à noção de tempo. Já o terceiro capítulo é dedicado ao estudo do tempo no âmbito da termodinâmica. Dessa forma, a partir da noção de entropia, Alain Fuchs e Roger Balian constroem seus argumentos sobre a irreversibilidade do tempo e Ladislav Robert explora a biologia do envelhecimento.

A segunda parte do livro também é formada por três capítulos que focam as relações entre o tempo, o homem, a cultura e a sociedade. Assim, são discutidos os ritmos do tempo, a percepção do tempo através das artes, os invariantes culturais ligados às artes e a relação entre o tempo e as mídias. Essa diversidade de textos, ideias e concepções será explorada nas seções seguintes deste capítulo e permitiu a construção de uma visão mais global sobre o tempo.

Esse foi um ponto importante na construção dos instrumentos de pesquisa e na opção pelo referencial teórico utilizado – a Teoria dos Campos Conceituais. Diante de uma pletora de significações do tempo, com uma enorme diversidade de aplicações, de concepções e de possibilidades de utilização de referenciais teóricos,

a opção que fizemos privilegiou (1) as questões ligadas à atividade do sujeito que procura significar determinadas relações conceituais; (2) o estabelecimento das formas de organização da ação quando determinado sujeito se coloca frente a determinado quadro cultural e (3) as maneiras de interação entre as formulações subjetivas e culturais.

1.3) O problema da medida do tempo

As noções cotidianas de tempo e de espaço estão muito imbricadas uma na outra. No passado, já havia essa ideia, onde as distâncias eram medidas em horas, dias ou meses de caminhada. Isso pode ser verificado nos dias hoje quando é necessário indicar a distância entre dois lugares e são enunciadas frases como: “são 20 minutos de carro.” O inverso também é feito, por exemplo, quando pequenos intervalos de tempo devem ser medidos e, em uma tela de um osciloscópio, são “transformamos” em pequenas distâncias.

Nesse contexto, as medidas de espaço e de tempo estão, de certa forma, atreladas ao conceito de velocidade, algo que já fora afirmado por Piaget em um contexto distinto, mas relacionado. É o que se pode dizer sobre a definição atual do metro, que leva em consideração a distância percorrida pela luz em um intervalo definido de tempo²².

A definição da medida de tempo evoluiu para tornar-se mais precisa ao longo da história. O segundo, unidade de tempo, foi definido na sua origem como a fração 1/86400 do dia solar médio. A definição exata de “dia solar médio” foi deixada aos astrônomos. Contudo, essa definição não era satisfatória por causa das irregularidades da rotação da Terra. Para dar mais precisão à definição da unidade de tempo, a 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (1960, Resolução 9; CR, 86) aprovou uma definição, dada pela União Astronômica Internacional, que estava baseada no ano tropical²³ de 1900. Enquanto isso, as pesquisas experimentais

²² De acordo com a 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, de 1983, “o metro é o comprimento do trajeto percorrido no vácuo pela luz durante um intervalo de tempo de (1/299 792 458) de segundo.” <<http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/chapter2/2-1/metre.html>> Acesso em 29.mar.2012. tradução nossa.

²³ Ano tropical é o período durante o qual a Terra executa uma revolução completa em sua órbita em torno do Sol com relação à posição do equinócio vernal (da primavera no hemisfério norte). O intervalo de tempo definido para o ano tropical de 1900 é 31.556.925,97474 segundos (HOMANN, 2001).

tinham já mostrado que uma escala atômica de tempo, na transição entre dois níveis de energia de um átomo ou de uma molécula, poderia ser realizada e reproduzida com uma precisão muito mais elevada.

Considerando que uma definição de alta precisão da unidade de tempo do Sistema Internacional seria indispensável para a ciência e a tecnologia, a 13ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (1967/68, Resolução 1 ; CR, 103 e Metrologia, 1968, 4, 43) substituiu a definição de segundo pela seguinte: “o segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.” Na seção de 1997, o Comitê Internacional confirmou que esta definição se refere a um átomo de césio em repouso, a uma temperatura de 0 K.

Dessa forma, é possível perceber que a história da medida de tempo leva em consideração a adoção implícita de um referencial que esteja em repouso em relação ao evento utilizado como padrão para o tempo. A necessidade de se efetuar uma medida de tempo cada vez mais precisa traz consigo a ideia de tempo próprio, que será discutida mais à frente. Antes, porém, vamos apresentar a discussão sobre a percepção de tempo.

1.4) A percepção do tempo

Não há, ainda, uma teoria convincente que dê conta do problema da percepção consciente do tempo. Diversas explicações já foram construídas, como a do filósofo Immanuel Kant, que considerava que a noção de tempo era subjetiva, em oposição ao tempo absoluto de Newton. Nessa concepção, o tempo possui uma marca de nossa intuição, e, não, uma objetividade ligada às situações. (WHITROW, 1993). No artigo “*Les dix invariants culturels de la représentation du temps*”, Hervé Barreau afirma que

Quand on aborde le temps de la vie quotidienne, on est spontanément porté à privilégier certaines expériences temporelles qui, pour une raison ou pour une autre, semblent révéler l'essence de la temporalité ou de ce qu'on appelle aussi le temps vécu.²⁴
(BARREAU, 2001. p. 193).

²⁴ “Quando se aborda o tempo da vida cotidiana, foca-se espontaneamente em privilegiar certas experiências temporais que, por uma razão ou por outra, parece revelar a essência da temporalidade, ou do que se chama também de tempo vivido” (Tradução nossa)

Acreditamos que essa percepção de tempo vivido esteja intimamente ligada aos fenômenos periódicos, cuja frequência de repetição indica algum padrão para medida das durações dos eventos. Tal processo ocorre desde os primórdios da humanidade e leva em consideração alguns fenômenos macroscópicos (ciclo da Lua; estações do ano; posições das estrelas, dos planetas; movimento do Sol; etc.). Dessa forma, a interação do homem com o meio ao seu redor, associado às suas necessidades e seus objetivos, conduziu ao estabelecimento de uma noção cíclica para o tempo.

Para Barreau (2001), há dez invariantes culturais que são associados à noção e à percepção de tempo. Como o nome sugere, eles são ditos “invariantes” porque aparecem em todas as culturas, mesmo que haja alteração na maneira como são utilizados. São eles: os biorritmos, as idades da vida, as adaptações comportamentais, o sincronismo, a gramática das locuções temporais, a condução da narrativa, o mito do tempo, o tempo cosmo-bio-social e o calendário, os relógios naturais e os relógios artificiais. O autor defende a ideia de que a noção do tempo vivido está presente nesses invariantes. Assim, para ele, os sujeitos constroem culturalmente uma percepção de tempo que se relaciona aos aspectos biológicos e físicos e procuram representá-la em diversos níveis de nosso cotidiano.

Esses invariantes culturais ligados à noção de tempo extrapolam em muito a apropriação realizada pelos diversos campos conceituais da Física e estão presentes nas concepções dos estudantes em sala de aula. Dessa forma, a compreensão da noção de tempo, seja na MC ou na TRR, exige uma coordenação de diversos conceitos, provenientes tanto de formulações científicas quanto de formulações mais cotidianas. Dizendo de outra maneira, parece-nos mais adequado que se considere o tempo como um *schème* e se investigue, como preconizado pela TCC, os invariantes operatórios mobilizados pelos sujeitos em cada situação. Essa abordagem responde melhor à questão da operacionalidade das formulações pessoais frente a determinada atividade, como tentarei mostrar no capítulo seguinte.

1.5) O tempo na Mecânica Clássica

A princípio, iremos considerar que a Mecânica Clássica é a que está consolidada nos *Principia* de Isaac Newton (NEWTON, 1983). Nesse trabalho,

Newton apresentou as bases para o estudo dos movimentos dos céus e da Terra, por meio da utilização dos conceitos de força, massa e inércia.

Mas, o grandioso trabalho de Newton tem uma base sólida em estudos conduzidos por outros cientistas, como é o caso de Galileu. No trabalho do italiano são encontradas algumas bases conceituais que, posteriormente, podem ser verificadas em Newton (GALILEI, 1992). A inércia e a relatividade do movimento são duas importantes ideias desenvolvidas por Galileu. Além disso, há trabalhos posteriores aos *Principia* que estabeleceram outras relações não exploradas por Newton, como é o caso da relação entre força e aceleração (EULER, 1985).

A respeito do estudo do movimento relativo, seguirei o raciocínio proposto por Feynman, Leighton & Sands (2008, pp 15-1 a 15-3). Dois referenciais, O e O', como dois sistemas coordenados tridimensionais. Inicialmente, em um instante arbitrariamente chamado de $t = 0$, esses dois sistemas estão juntos. Mas, em determinado instante, o sistema O' começa a se mover ao longo do eixo X, com velocidade constante V, em relação a O. Dessa forma, os dois referenciais são ditos inerciais, pois não estão dotados de aceleração.

Após um intervalo de tempo t, a distância que O' percorreu em relação a O pode ser dada pela expressão *distância = velocidade x intervalo de tempo* ($d = v.t$). A figura a seguir é uma forma de representação dessa situação.

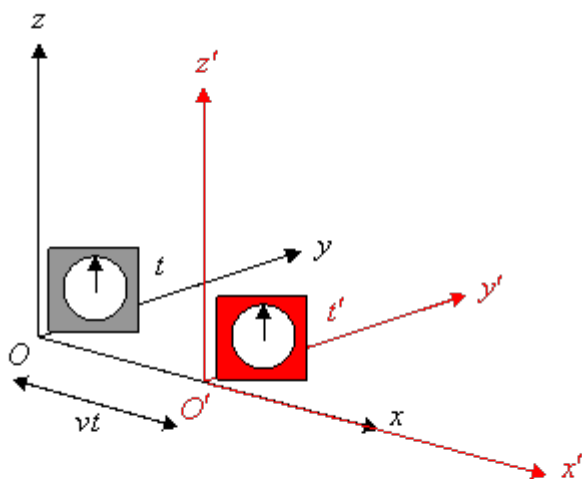


Figura 1: Sistemas de coordenadas O e O'.

Consideremos que, de acordo com um observador fixo em O', ocorra um evento qualquer (por exemplo, a explosão de um fogo de artifício). Esse evento,

para O' , ocorreu nas coordenadas espaciais x' , y' , z' e em certo instante de tempo t' (medido pelo relógio que está fixo em O').

De acordo com Galileu, é possível obter em quais coordenadas esse mesmo evento ocorreu em relação a O . Ou seja, é possível encontrar três coordenadas espaciais e uma temporal que representem a ocorrência da explosão do fogo de artifício de acordo com um observador fixo em O .

As transformações de Galileu para esse caso indicam que

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

A coordenada espacial x foi alterada porque o movimento se processou nessa direção. Em relação às outras duas coordenadas espaciais, não houve alteração. Nesse contexto, algumas considerações importantes devem ser feitas.

Consideremos um corpo de massa m que sofre a ação de uma força de módulo F' (medido em pelo observador O') na direção do eixo x' . A velocidade desse corpo, medida por O' , é dada por u'_x e sua aceleração é a'_x . Podemos avaliar quais seriam os valores dessas grandezas medidas pelo observador fixo em O . Para isso, vamos efetuar a diferenciação da primeira das equações. Encontraremos, assim, a relação entre as velocidades medidas em O e O' .

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}$$

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt}$$

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{d}{dt}(x - vt)$$

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v \frac{dt}{dt}$$

$$u'_x = u_x - v$$

Efetuando-se nova diferenciação em relação ao tempo, temos as acelerações que podem ser medidas para determinado objeto nos dois referenciais.

$$\begin{aligned}a'_x &= \frac{du'_x}{dt'} \\ \frac{du'_x}{dt'} &= \frac{du'_x}{dt} \\ \frac{du'_x}{dt} &= \frac{d}{dt}(u_x - v) \\ a'_x &= a_x\end{aligned}$$

Por fim, admitindo-se, como o fazem Galileu e Newton, que a massa medida é a mesma nos dois referenciais, temos, pela segunda lei de Newton, que

$$\begin{aligned}F'_x &= m \cdot a'_x \\ F_x &= m \cdot a_x \\ F'_x &= F_x\end{aligned}$$

A conclusão imediata a que se pode chegar é que, a despeito das transformações de coordenadas entre referenciais inerciais, as leis da MC não se alteram. Esse é o princípio da Relatividade que Galileu enunciou, sem o auxílio do cálculo diferencial, e que serviu de base conceitual para Newton. Nesse contexto, quando as regras de transformação indicadas acima são aplicadas, as leis que regem os movimentos (Leis de Newton, conservação da quantidade de movimento, conservação de energia, etc.) não sofrem alteração em sua estrutura, apesar de o valor da coordenada x ter sido alterada.

Outro ponto, o mais importante para essa seção, é a consideração tácita de que os instantes de tempo e, por consequência, as durações dos eventos, são tomados independentemente do sistema de referência inercial ($t' = t$). A indicação é a de que, a despeito de dois observadores poderem perceber posições ou velocidades diferentes para determinado evento, ambos devem concordar em relação ao intervalo de tempo que durou esse evento. Dessa forma, na MC, o tempo é uma grandeza absoluta, visto que a medida efetuada para a ocorrência de um evento será sempre a mesma não importa a qual sistema de referência inercial o relógio esteja ligado.

Nesse ponto, é importante que se tenha atenção ao significado do termo “absoluto” dentro dessa teoria. Segundo Balibar (2001), há dois significados que podem ser evocados por essa palavra. O primeiro, próprio da Física, é o que se opõe ao termo “relativo” e pode ser expresso como uma grandeza cujo valor não

depende da maneira como ela é observada. O segundo, de uso mais cotidiano, refere-se a uma coisa (e não mais uma grandeza) que não interage com nada, ou seja, não é afetada por outras coisas que estão na sua presença.

Usando o primeiro significado, pode-se afirmar que a posição ocupada por determinado objeto e a sua velocidade são relativas. A aceleração, o tempo e a força são absolutos. No segundo sentido, é possível dizer que o tempo, o espaço e as leis da Mecânica são absolutas.

O tempo, no quadro teórico da MC é uma grandeza física que não é afetada pela maneira como se observa o evento. Portanto, há, nesse quadro teórico, um tempo que flui da mesma maneira para todos os observadores inerciais, independentemente de seus estados de movimento ou de repouso. Se dois desses observadores marcarem, em seus relógios, o intervalo de tempo de ocorrência de um fenômeno mecânico qualquer, as marcações deverão ser as mesmas.

Essa característica do tempo não foi demonstrada, mas assumida como verdadeira para as transformações de coordenadas. Segundo Whitrow (1993, p. 100),

A invenção dos relógios mecânicos que, quando regulados de forma adequada, funcionam continuamente durante anos a fio influenciou muito a ideia da uniformidade e da continuidade do tempo. Essas características estavam implícitas na ideia do tempo físico adotada por Galileu (...). Embora ele não fosse o primeiro a representar o tempo por uma linha reta geométrica, tornou-se o pioneiro mais influente dessa ideia por meio da teoria do movimento exposta nesse livro "Discursos sobre duas novas ciências".

Mas, se essa noção estava em consonância com os fenômenos observados à época e se mostrava eficaz no escopo da mecânica newtoniana, a ideia de tempo absoluto teve que ser revista com o advento do Eletromagnetismo. Graças a James Clerk Maxwell, as leis da Física foram ampliadas na segunda metade do século XIX, incorporando o eletromagnetismo, em um grande esforço teórico para unificar o magnetismo e a eletricidade (BEN DOV, 1996, p. 101) .

A interpretação de uma das equações que ele havia desenvolvido dá conta de que a luz é uma onda eletromagnética que viaja sempre com a mesma velocidade c (aproximadamente 300 000 km/s). Por comparação ao que ocorre com a propagação do som no ar, foi proposta a existência de um meio material em relação ao qual a luz pudesse se deslocar. Esse meio era o éter, uma substância

com propriedades misteriosas²⁵ que permaneceria em repouso em relação ao espaço absoluto e que deveria oscilar com a passagem da luz (SPAGNOU, 2012).

Não é o objetivo desse texto apresentar os desenvolvimentos matemáticos, mas é possível identificar que, ao serem aplicadas as transformações de coordenadas de Galileu às equações de Maxwell, havia um problema estrutural, visto que as leis mudavam de forma. A relatividade de Galileu parecia contrária ao que havia sido previsto para a velocidade da luz. Por exemplo, se um corpo se deslocasse com uma velocidade v em relação ao solo e, em determinado momento, emitisse um feixe luminoso no mesmo sentido de seu movimento, a velocidade da luz medida pelo corpo deveria ser $c - v$. Mas, como já indicado, a velocidade da luz, de acordo com Maxwell, deveria ser, sempre, c , independentemente da fonte emissora.

Para explicar essa incoerência, Einstein precisou rever conceitos já estabelecidos. Um deles, o de tempo absoluto, será focado na próxima seção.

1.6) O tempo relativístico

Conforme indicado na seção anterior, a incompatibilidade teórica entre o Eletromagnetismo e a MC foi o contexto que permitiu a Einstein a construção da TRR. Ariassecq e Greca (2012) afirmam que essa assimetria entre os fenômenos eletromagnéticos que poderiam ocorrer em referenciais em repouso e em movimento uniforme foi o ponto de partida para que o físico alemão realizasse seu trabalho teórico.

A existência do éter havia sido descartada por meio da interpretação dos resultados de um conjunto de experimentos conduzidos justamente para tentar detectá-lo, chamado de experimento de Michelson-Morley (FEYNMAM, LEIGHTON & SANDS, 2008, pp 15-5 a 15-7). É bem conhecido o fato de que não foi a realização de um único experimento a responsável final pelo abandono da ideia do éter, uma vez que versões do que haviam feito os físicos americanos continuaram a ser tentadas durante vários anos. Os resultados provenientes do experimento de Michelson-Morley são, porém, uma espécie de marco para a possibilidade de haver

²⁵ O modelo proposto para a propagação da luz considerava que o éter deveria ser absolutamente rígido e, ao mesmo tempo, não material para que a luz pudesse atingir uma velocidade de tal magnitude.

outras explicações sobre a aparente incompatibilidade entre a MC e o Eletromagnetismo.

A ideia do experimento é simples: se o éter existe, o movimento da Terra em relação a ele deveria produzir uma espécie de vento e, com isso, haveria uma influência na propagação da luz. O equipamento utilizado no experimento foi um interferômetro, mostrado, esquematicamente, a seguir.

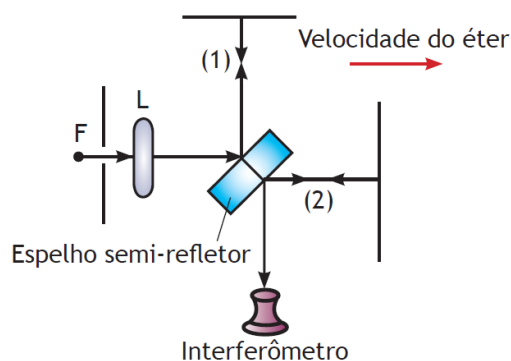


Figura 2: Esquema do interferômetro de Michelson-Morley.

A fonte F emite um feixe de luz que passa por uma lente L e, logo após, por um espelho semi-refletor, percorrendo dois caminhos, 1 e 2, de mesmo tamanho D. Assim, o aparelho divide um feixe de luz em dois, de tal forma que um deles desloca-se na mesma direção em que a Terra se move em torno do Sol. O outro feixe é orientado em uma direção perpendicular à do primeiro. Após percorrerem as distâncias iguais, os feixes chegam a um aparelho, chamado interferômetro, que consegue identificar o padrão da interferência ocorrida entre eles.

O problema com as equações do eletromagnetismo poderia ser resolvido se as transformações de coordenadas de Galileu fossem substituídas por outras, mais complexas, deduzidas por Hendrick Lorentz. Essas novas transformações – chamadas Transformações de Lorentz – são:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \frac{t - \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Vale ressaltar que Lorentz chegou a essas equações a partir de argumentos puramente eletrodinâmicos, estudando a propagação de uma frente de onda luminosa. Portanto, seu objetivo não era estudar a incompatibilidade entre a Mecânica e o Eletromagnetismo.

Quando essas transformações são aplicadas, as leis Físicas permanecem inalteradas nos referenciais inerciais, algo mais amplo que o princípio da relatividade de Galileu. Esse novo e mais abrangente princípio da relatividade é utilizado por Einstein na Teoria da Relatividade.

Essa nova transformação de coordenadas apresenta uma novidade surpreendente. O tempo não é mais absoluto, em nenhum dos dois sentidos atribuídos a essa palavra por Balibar (2001).

Considere um evento E que ocorra em um ponto x, y, z e em um instante t em relação ao referencial O . Isso significa atribuir uma simultaneidade entre dois eventos: a passagem de um objeto sobre o ponto M e a indicação dos ponteiros de um relógio nesse mesmo ponto. Por consequência, estabelece-se implicitamente que há uma rede de relógios sincronizados com o que é colocado na origem do referencial O e distribuídos na totalidade do espaço.

Usando a transformação temporal de Lorentz, é possível mostrar que, por possuir coordenadas espaciais x diferentes nos referenciais O e O' , o evento E ocorrerá, também, em instantes de tempo t e t' distintos. Assim, um evento que ocorra em um dado instante de tempo no referencial O' irá ocorrer em outro instante distinto no referencial O . Dessa forma, é possível concluirmos que os intervalos de tempo e a simultaneidade deixam de ter um caráter absoluto para serem considerados relativos.

Além disso, percebe-se uma intrínseca relação entre o espaço e o tempo que, para a TRR, passam a possuir uma característica integrada – o espaço-tempo. Nesse sentido, em oposição à MC, onde os comprimentos e os intervalos de tempo são independentes de qual sistema de referência inercial, cada um dessas grandezas deixam de ser absolutas se tomadas isoladamente.

O novo invariante da TRR é tomado como sendo uma “mistura” entre coordenadas temporais e espaciais. Ele corresponde a um intervalo espaço-temporal entre determinado evento (x, y, z, t) e o evento infinitesimalmente vizinho $(x + dx, y + dy, z + dz, t + dt)$. A medida desse intervalo é dado por

$$d_0^2 = c^2 \cdot dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Essa foi a formulação de Minkowski para métrica do espaço-tempo quadridimensional (SPAGNOU, 2012).

Além disso, é possível perceber que a velocidade da luz também é absoluta nesse sistema de transformações, algo que Einstein postulava na TRR. Se efetuarmos o mesmo procedimento da seção anterior para a obtenção da velocidade relativa, teremos

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x \cdot v}{c^2}}$$

Para qualquer situação em que se estiver estudando, a transformação da velocidade de um feixe de luz entre dois sistemas de referência inerciais, o resultado será sempre o mesmo. Assim, nesse novo sistema de transformações, a velocidade da luz é absoluta e representa o maior valor possível para as velocidades.

A estruturação dessas ideias proposta por Einstein leva em conta a necessidade de um sistema de referenciais inerciais nos quais as leis Físicas não mudem de forma e na constância da velocidade da luz.

o insucesso das experiências feitas para constatar um movimento da Terra em relação ao meio luminífero leva à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Eletrodinâmica, os fenômenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à ideia de um repouso absoluto. Pelo contrário, em todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da mecânica, também são igualmente válidas leis ópticas e eletrodinâmicas da mesma forma - o que, até à primeira ordem de aproximação, já está demonstrado²⁶. Vamos erguer à categoria de postulado esta nossa suposição (a cujo conteúdo chamaremos daqui em diante 'Princípio da Relatividade'); e, além disso, vamos introduzir o postulado - só aparentemente incompatível com o primeiro - de que a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte

²⁶ Einstein afirmava não conhecer o trabalho de Lorentz quando escreveu as bases da Relatividade Restrita.

luminosa. Estes dois postulados são suficientes para chegar a uma eletrodinâmica de corpos em movimento, simples e livre de contradições, baseada na teoria de Maxwell para corpos em repouso. A introdução de um 'éter luminífero' revelar-se-á supérflua, visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um 'espaço em repouso absoluto', nem de atribuir um vetor velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo eletromagnético. (EINSTEIN, 2011, pp 1 e 2).

A citação anterior é parte da introdução do artigo "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento", publicado em 1905 no respeitado periódico alemão "Annalen der Physik". Esse é o artigo que inaugura a Relatividade de Einstein.

Na continuação do artigo, Einstein ataca um ponto crucial: o das durações dos eventos medidas em referenciais distintos. Consideremos um evento que dura certo intervalo de tempo $\Delta t'$ para um observador situado em O' . Isso equivale a dizer que esse evento teve início em um instante t'_1 e terminou em outro instante t'_2 . Dessa forma, temos que

$$t' = t'_2 - t'_1$$

Se cada instante de tempo citado for transformado para o sistema O , considerando-se as transformações de Lorentz, o novo intervalo de tempo, Δt , não será igual ao anterior. Há, entre esses intervalos de tempo, uma diferença que pode ser obtida por

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

A conclusão a que se chega é que o intervalo de tempo medido pelos dois referenciais é distinto, sendo que o intervalo medido pelo referencial O é maior que o de O' . A esse fenômeno, sem equivalente na Física Clássica, damos o nome de Dilatação do Tempo.

São várias as aplicações desse fenômeno. Dentre outras, podemos citar o funcionamento dos aparelhos de localização global (GPS), o estudo do tempo de

vida de partículas subatômicas ou as especulações sobre a construção de uma “máquina do tempo”²⁷.

Sobre essa noção de tempo relativo, Paty (2001, p. 81) afirma que

avec la théorie de la relativité restreinte, le temps est mis dans la dépendance de lois générales des phénomènes qui sont l’objet de la mécanique et de l’électromagnétisme : il est constitué comme grandeur physique de manière à respecter le principe de relativité de la mécanique et la constance de la vitesse de la lumière indépendamment du mouvement de la source lumineuse, loi fondamentale de l’électromagnétisme.²⁸

Para conseguir essa união dos princípios em um todo teórico consistente, foi necessário, então, submeter a noção de tempo (e, também, outras noções como o espaço e a massa) a esses princípios. A alteração percebida no estatuto epistemológico de tempo, que deixa de ser a grandeza absoluta da MC para assumir o papel de grandeza relativa na TRR, ocorre como uma imposição teórica.

Por fim, dentro desse contexto da relatividade do tempo, é necessário que se faça uma distinção entre o “tempo próprio” e o “tempo coordenado”. O tempo próprio possui uma definição local, válida na vizinhança imediata do local em que a medida foi feita pode ser definido como sendo o intervalo de tempo medido em certo referencial de tal forma que dois eventos sejam locais em relação a este referencial ou seja, esses eventos ocorrem na mesma posição x , y , z (EINSTEIN, 2009). Por exemplo, dentro de um trem, um viajante almoça e janta no mesmo local (mesma mesa do vagão-restaurant, por exemplo). O intervalo de tempo entre o almoço e o jantar é próprio dentro do trem e impróprio em relação à Terra ou ao Sol.

No entanto, a ideia de tempo coordenado pode ajudar a resolver esse problema das diferenças de marcação. Ele consiste em uma regra de transformação

²⁷ A viagem no tempo aqui considerada, no âmbito da TRR, é sempre em direção ao futuro. Tal teoria não admite viagens no tempo em direção ao passado.

²⁸ “Com a teoria da relatividade restrita, o tempo é posto em dependência de leis gerais dos fenômenos que são o objeto da mecânica e do eletromagnetismo: ele é constituído como uma grandeza física de modo a respeitar o princípio da relatividade da mecânica e à constância da velocidade da luz independente do movimento da fonte luminosa, lei fundamental do eletromagnetismo.” (tradução nossa)

entre referenciais, que leva em conta a velocidade relativa entre eles, para que seja possível saber a equivalência entre os tempos próprios. Mesmo sem a noção da relatividade do tempo, a ideia de coordenação de tempo seria válida e útil. É o que fazemos, por exemplo, quando utilizamos o conceito de fuso-horário (PETIT, 2001, p 40).

Como exemplo, será discutido o chamado “paradoxo dos gêmeos” que, apesar do que foi difundido, não apresenta qualquer tipo de ambiguidade lógica em sua existência (DURANDEAU, 1980). A ideia é imaginar dois irmãos gêmeos, um dos quais é astronauta. Esse parte em uma viagem interplanetária com uma velocidade próxima à da luz. Por causa da dilatação do tempo que irá ocorrer, quando da sua volta, o irmão astronauta terá uma idade menor do que a do que ficou na Terra (HAWKING, 2002). Mas, o aparente paradoxo está colocado no fato de que, para o irmão astronauta, é o que ficou na Terra que está em movimento e, portanto, o que deveria envelhecer menos.

Para a explicação dessa situação, no âmbito da TRR, considere um relógio R' que está em movimento em relação a outro relógio R , idêntico ao primeiro. Dessa forma, o relógio R' deverá se retardar em relação a R . Mas, pode-se dizer, também, que o relógio R está em movimento em relação a R' . Logo, a pergunta é: qual relógio se retarda em relação ou outro?

O paradoxo apresentado (cada relógio se atrasa em relação ao outro) é resolvido se for levado em conta que a relação entre o tempo próprio e impróprio só é válida para dois eventos – e somente para dois (SPAGNOU, 2012). A ambiguidade que aparece nesse exemplo vem do fato de que estão sendo considerados quatro eventos e, não, apenas dois.

Considere o relógio R fixo no referencial inercial O e o relógio R' fixo no referencial O' , que se move com velocidade constante v em relação a O . Pode-se afirmar que o relógio R' é uma fonte periódica de eventos e um observador próximo a ele pode medir o intervalo de tempo próprio entre dois desses eventos (por exemplo, duas passagens do ponteiro dos segundos sobre a mesma posição do mostrador). O observador próximo ao relógio R , considerando os mesmos eventos anteriores, medirá um intervalo de tempo impróprio maior do que aquele medido pelo observador próximo a O' .

Por outro lado, se forem consideradas duas passagens do ponteiro dos segundos sobre a mesma posição do mostrador do relógio R , haveria, nesse caso,

dois outros novos eventos aos quais a relação entre tempo próprio e impróprio se aplicaria novamente, sem que haja qualquer tipo de contradição. Dessa forma, cada referencial medirá um tempo próprio por que ocorrem dois eventos separados em cada um deles.

Mas, ainda deve ser colocada a questão da comparação das medidas do tempo entre dois eventos em um dado referencial. Para isso, é possível de se considerar que, no instante inicial, os dois relógios estejam sincronizados na origem do referencial inercial O . A partir desse momento, o relógio R' , ligado ao referencial R' , começa a se mover com velocidade constante em relação a O' . Esse relógio “em movimento” sofrerá um atraso em sua marcação quando se fizer a comparação com R , ou seja, quando este estiver de volta ao ponto de origem e os dois relógios forem colocados lado a lado (EINSTEIN, 2009).

Não se pode aplicar o mesmo raciocínio se o observador se coloca no ponto de vista de R' porque O' não é um referencial inercial. Em sua viagem de ida e volta, ocorre a aceleração na saída e no retorno. Essa assimetria entre as duas situações já é suficiente para que se conclua que posicionar um observador nos dois referenciais não pode restar na mesma conclusão (SPAGNOU, 2012).

O raciocínio pode ser, então, estendido para os gêmeos, bastando, para isso, que se efetue a troca dos relógios pelos batimentos cardíacos dos dois irmãos. Dessa forma, não há qualquer ambiguidade no chamado “paradoxo dos gêmeos”. O irmão astronauta, por ficar submetido a acelerações, terá, de fato, um envelhecimento mais lento quando em comparação com o que ficou na Terra, apesar de aquele não se dar conta disso a não ser quando eles forem colocado face a face.

A discussão sobre essa noção de tempo foi importante, no âmbito deste trabalho, para identificar possíveis pontos de interesse didático. Os momentos históricos de crise e as maneiras como as soluções foram construídas são, potencialmente, boas formas de abordagem em sala de aula, tanto para o processo de ensino-aprendizagem, quanto para a coleta de dados da pesquisa.

1.7) Uma primeira síntese possível

Conforme foi possível discutir, a noção de tempo é ampla e permeia todas as atividades humanas, sejam elas científicas ou não. Essa pluralidade de formas de

conceber o tempo (cíclico, linear, reversível, irreversível, absoluto, relativo, etc.) está na base de uma noção que é, ao mesmo tempo tão familiar e tão misteriosa.

A concepção do tempo como um *schème* é a que nos parece mais adequada para dar conta de toda essa complexidade e das diversas formas de sua utilização. Ela permite, por exemplo, compreender as formas de ativação de cada uma das assim chamadas zonas do perfil epistemológico apresentado por Martins e entender por quais mecanismos determinado sujeito vai desenvolvendo as coordenações entre tempo, espaço e velocidade a partir das situações a que ele vai sendo apresentado dentro de determinado meio cultural.

Essa discussão sobre o significado psicológico de um *schème* e sua posição central na TCC como elemento organizador da ação do sujeito será apresentada e aprofundada no capítulo seguinte. Nele, será possível compreender melhor essa opção metodológica e epistemológica.

Por ora, é importante frisar dois pontos centrais nessa discussão.

O primeiro diz respeito ao fato de que a noção de tempo não se reduz a um único conceito, mesmo que se considerem zonas de significação com estatutos ontológicos e epistemológicos distintos. Em geral, as tradições de pesquisa ligadas, direta ou indiretamente, à epistemologia bachelardiana consideram a existência de um conceito de tempo que agrega, em si, diferentes níveis de utilização e significação desse conceito.

No entanto, a noção de tempo agrega em si conceitos distintos e profundamente interligados como é o caso de duração, rapidez, simultaneidade, deslocamento, atraso, etc. É necessário que haja, no sujeito, uma maneira de organizar esses conceitos a partir de quais são as situações a dominar e quais são os objetivos percebidos/assumidos na ação. Essa organização permite retirar informações tidas como pertinentes de cada situação e construir proposições com elas, a partir de uma rede de conceitos. Nesse sentido, a classe de situações às quais se aplica o *schème* de tempo são aquelas que envolvem qualquer tipo de evolução temporal de um sistema.

Ao organizar as informações de que um relógio pode marcar diferentes intervalos de tempo para a ocorrência de um evento, dependendo do sistema de referência ao qual ele está ligado, há várias possíveis significações. Por exemplo, o pintor espanhol Salvador Dalí produziu o quadro “A persistência da memória”, o escritor francês Pierre Boulle escreveu o livro “O planeta dos macacos” e os físicos

experimentais americanos Joseph Hafele e Richard Keating conceberam um experimento com relógios atômicos para tentar medir a diferença de marcação entre eles.

Essa característica está diretamente associada a uma outra, que é a do desenvolvimento ontogenético do *schème* de tempo, que ocorre em estreita conexão com o desenvolvimento geral do sujeito, desde o estágio sensório-motor, onde as ações são pautadas pelo ponto de vista próprio e único (só há uma maneira de organizar a atividade – a partir do ponto de vista próprio) até o momento em que se coordenam os *schèmes* de tempo e de movimento. Nesse processo, há que se considerar que cada estágio alcançado se apoia sobre o(s) anterior(es) e prepara o(s) subsequente(s), o que significa dizer que os estágios já ultrapassados estão, de certa forma, presentes no estágio atual, como sub-*schèmes*. Logo, esses sub-*schèmes* podem ser acessados mesmo se já ultrapassados, desde que o sujeito reconheça nas situações as características mais marcantes deles (CARVALHO, JR e PARRAT-DAYAN, 2013).

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico para construção dos instrumentos de pesquisa e de análise dos dados é a TCC de Gérard Vergnaud. Essa teoria começou a ser desenvolvida nos anos 1980 para dar conta da complexidade inerente ao aprendizado das matemáticas, com especial atenção às estruturas aditivas e multiplicativas. Mas, apesar das importantes implicações didáticas, a TCC deve ser considerada uma teoria psicológica, visto que seu foco principal é a análise do desenvolvimento do sujeito em ação.

Gérard Vergnaud é um psicólogo francês que teve a sua tese de doutorado orientada por Jean Piaget no final da década de 1960. Nesse sentido, é possível perceber a influência piagetiana na obra de Vergnaud, sobretudo no que diz respeito às formulações de “*schème*” e de “invariante operatório”. Porém, a TCC não é apenas uma extensão da psicologia genética de Piaget, uma vez que ela dialoga com formulações ligadas, por exemplo, à semiótica social.

Apesar de sua origem ligada às matemáticas, a TCC tem sido aplicada em outras áreas, seja como instrumento para o planejamento de atividades (CARVALHO JR e AGUIAR JR, 2008), seja como teoria de base para a interpretação das construções dos sujeitos (ARRIASECQ e GRECA, 2006; COSTA e MOREIRA, 2005; FANARO, OTERO e MOREIRA, 2009; MOZZER, 2013). É possível perceber, também, a interação, na França, entre os Campos Conceituais e as didáticas profissionais, com o estudo do desenvolvimento das competências necessárias no comércio e nas áreas de tecnologia (LEVAIN, LE BORGNE e SIMARD, 2006; GALAND, 2006; CHAUVIGNÉ e COULET, 2010; VERGNAUD, 2012). Além disso, há, na América do Sul, um crescente interesse pela aplicação da TCC em estudos sobre conceitualização em educação em ciências (CUDMANI e PESÁ, 2008; ESCUDERO e JAIME, 2009; FANARO, OTERO e MOREIRA, 2009; CARVALHO JR. e AGUIAR JR., 2010; CARVALHO, AGUIAR e BRUNO, 2013; MOZZER, 2013).

Por se tratar de uma teoria ainda relativamente recente, seu desenvolvimento ainda está em curso, seja pelo próprio autor, seja pelos seus seguidores mais próximos ou por pesquisadores que buscam utilizar alguns de seus

elementos centrais em suas pesquisas. Esse dinamismo é uma característica importante a ser frisada porque indica a necessidade de uma profunda interpretação de seus conceitos principais e de sua adaptação para certas áreas de estudo que ainda não foram exploradas.

É esse movimento de apresentação das ideias centrais e originais da TCC e, ao mesmo tempo, de extrapolação de suas conclusões e articulação com outros modelos teóricos que será a tônica desse capítulo. Dada a característica complexa desse construto teórico de Vergnaud, faço a opção de uma apresentação mais recursiva das ideias centrais. Alguns pontos serão apresentados e reexaminados quando novos conceitos forem discutidos. Creio que, dessa forma, será possível uma melhor compreensão dos elementos-chave da TCC.

A primeira seção será dedicada à apresentação de alguns dos pontos essenciais dos Campos Conceituais, da forma como Vergnaud os tem utilizado atualmente. Na segunda seção, haverá uma discussão mais ampla sobre os dois conceitos que me parecem fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho: schème e conceito.

Nessa seção, faremos uma incursão sobre o desenvolvimento da noção de schème em Piaget e como Vergnaud se apropriou desse conceito para ser a chave mestra do sujeito em situação²⁹. Além disso, apresentaremos um breve estudo sobre a noção de conceito e quais foram os elementos centrais de interseção com a teoria de Vergnaud. Por fim, na terceira seção, faremos alguns aprofundamentos da TCC no tocante à educação em ciências. Nesse ponto, iremos propor o diálogo entre a Vergnaud e alguns autores importantes, além de aprofundar nos conceitos-chaves da TCC a partir de exemplos da pesquisa que está sendo relatada e de outros episódios narrados em artigos conhecidos.

²⁹ Mesmo sabendo do risco dessa simplificação, irei considerar, por enquanto, como « situação» qualquer atividade (teórica, experimental, individual, em grupo, etc) que exige do sujeito alguma atividade mental para propor soluções próprias.

2.1) A Teoria dos Campos Conceituais

A Teoria dos Campos Conceituais é uma teoria do desenvolvimento de conhecimentos e de competências complexos, que se desenrola durante um grande intervalo de tempo (VERGNAUD, 1990, 1991a e 2007). Construída a partir das pesquisas de Gérard Vergnaud sobre a didática da matemática, ela procura investigar o sujeito em situação.

Esse foco de análise fez Vergnaud dirigir a sua atenção às situações como elemento central para a construção dos saberes. Segundo o autor, é nas situações que repousa a significação das ações do sujeito, ou seja, é por meio das situações que o saber se torna operatório e, por isso, significativo (VERGNAUD, 2007).

A referência, então, buscada pelo autor, tanto na Psicologia Genética, quanto na Psicologia Sociocultural, privilegia os construtos relacionados à ação. No primeiro caso, a noção de *schème*, como uma construção interna ligada à organização da ação. No segundo caso, a noção de zona de desenvolvimento proximal, “palco” onde as ações do sujeito poderão se desenvolver.

Nesse sentido, uma das grandes contribuições da TCC é a de possibilitar uma integração entre os processos endógenos e exógenos de desenvolvimento, em um movimento duplo que permite: (1) de uma parte, expandir o mecanismo psicológico de construção, diferenciação e integração de *schèmes* a partir da avaliação das alterações de seus conteúdos epistêmicos e, (2) de outra parte, permitir a compreensão dos mecanismos operatórios ligados às interações do sujeito com os outros no curso de suas ações.

A conclusão a que chegamos é a de que, por meio dos conceitos de conceito-em-ação e teorema-em-ação, a TCC permite a integração do mecanismo piagetiano da equilíbrio com o conceito vigotskiano da zona de desenvolvimento proximal, desde que se façam algumas considerações de base.

Para apresentar essa conclusão, porém, é necessário que se faça algumas apresentações e definições.

2.1.1) A noção de campo conceitual

As situações são, por natureza, complexas. Dessa forma, uma dada situação exige vários conceitos para ser abordada e resolvida. Além disso, um

determinado conceito, como uma ferramenta que se desenvolve na cultura, pode ser utilizado em uma variedade de situações distintas. Por isso, só é possível avaliar o processo de desenvolvimento em ciências a partir de uma variedade de situações ou – que é equivalente em seu contexto mais amplo – a partir de uma variedade de conceitos.

Esse é o motivo pelo qual Vergnaud advoga a ideia de que se deva falar em *Campos Conceituais* ao invés de se estudar a utilização de conceitos isolados. A sua definição para um campo conceitual é ampla o suficiente para abarcar a complexidade do sujeito em ação, ou seja, o sujeito em face às situações. Para o autor, um campo conceitual é um conjunto de conceitos e situações, querendo dizer com isso que onde quer que se coloque a perspectiva – nos conceitos ou nas situações – a outra parte deve estar sempre presente (VERGNAUD, 1991a).

Isso pode ser interpretado da seguinte forma. As situações são parte integrante dos conceitos uma vez que funcionam como um “cenário” onde a ação se desenvolve. Esse cenário dá o contexto para as ações e suscita, no sujeito, o estabelecimento de relações entre os conceitos que são tidos como pertinentes para uma dada ação. Assim, é impossível que se tenha uma ação sem o contexto que lhe sustente.

Nesse sentido, Vergnaud (1990, p. 62) afirma que

un champ conceptuel peut être défini comme un ensemble de situations, dont la maîtrise requiert une variété de concepts, de procédures et de représentations symboliques en étroite connexion.³⁰

Dessa forma, a delimitação de um campo conceitual está em estreita conexão com as situações que se quer dominar. Por exemplo, o campo conceitual da MC comporta situações relacionadas ao movimento, suas causas e consequências, tomando como ponto de partida a observância de sistemas de referência inerciais nos quais são válidas as leis de Newton, com suas pressuposições de espaço e tempo absolutos, uniformes e isotrópicos.

³⁰ “Um campo conceitual pode ser definido como um conjunto de situações cujo domínio requer uma variedade de conceitos, de procedimentos e de representações simbólicas em estreita conexão.” (tradução nossa)

Mas, nem toda situação de movimento uniforme deve ser analisada dentro do campo conceitual da MC. Por exemplo, o movimento de um elétron pode estar relacionado aos conceitos de campo elétrico e campo magnético e, assim, será objeto de estudo dentro do campo conceitual do Eletromagnetismo. Ou, ainda, esse movimento pode ser visto do ponto de vista das interações com os demais elétrons de um sistema e, nesse caso, será abordado no campo conceitual da Física Quântica.

Essa multiplicidade de possibilidades de consideração de campos conceituais é alvo de críticas que podem ser resumidas na afirmação de que “se um campo conceitual pode ser *tudo*, então ele não é *nada*”. Ou seja, se é possível definir um campo conceitual com uma amplitude tão grande – ou tão pequena – quanto se queira, o conceito não é operacional, visto que ele pode abranger qualquer coisa.

Mas, a operacionalidade e a relevância da noção de campo conceitual estão ligadas, exatamente, a essa plasticidade, pois ela exige, tanto do pesquisador, quanto do professor, uma atenção constante quanto às situações que estarão em jogo, respectivamente, em um projeto de pesquisa ou no processo ensino-aprendizagem. O contorno de um campo conceitual será dado, portanto, pelas situações planejadas para serem apresentadas aos sujeitos e pelas características do conhecimento a ser trabalhado.

Esta pesquisa que está sendo relatada foi pensada para ser aplicada na região de fronteira entre dois campos conceituais: o da MC e o da TRR. Portanto, não queria caracterizar um determinado campo conceitual, mas analisar as condições para que determinado sujeito pudesse efetuar a transição entre os dois campos citados.

Nesse sentido, é importante frisar dois aspectos principais sobre a diferenciação entre os campos conceituais citados e já discutidos no capítulo precedente:

- (1) Os pressupostos dos dois modelos teóricos são distintos. A MC atribui ao tempo e ao espaço um caráter absoluto, uniforme e isomorfo. Por outro lado, a TRR considera que a velocidade da luz é que possui tal caráter absoluto. Essas diferentes formas de conceber a estrutura

teórica faz com que os conceitos utilizados em situações análogas sejam diferentes. Por exemplo, no estudo do efeito de uma força constante aplicada sobre um corpo inicialmente em repouso (com relação a um referencial inercial), o conceito de massa como uma propriedade intrínseca do corpo e, portanto, invariável, leva à conclusão, no âmbito da MC, de que uma força constante gera uma aceleração constante e, com isso, a velocidade do corpo pode aumentar indefinidamente. Já o conceito de massa como algo que pode variar em função da velocidade (ou da energia cinética) de um corpo, típico da TRR, conduz a outras previsões teóricas sobre essa mesma situação, como, por exemplo, a ideia da existência de um limite superior para as velocidades. Para a TRR, a velocidade não pode aumentar indefinidamente porque seu aumento está sempre associado a um crescimento na massa (e, portanto, na inércia) do corpo.

- (2) Mesmo que, matematicamente, as conclusões que podem ser obtidas a partir da TRR convirjam para aquelas da MC no limite de baixas velocidades, não é possível afirmar a continuidade ou uma entre esses dois campos conceituais. Nesse sentido, há rupturas importantes na forma de resolver problemas que envolvem cada um dos campos conceituais, o que implica na utilização de diferentes conceitos e de diferentes schèmes. De acordo com Piaget e Szeminska (1941), qualquer tipo de conhecimento, científico ou cotidiano, supõe um sistema de princípios de conservação (explícito ou implícito). Dessa forma, com diferentes princípios de conservação, pode-se concluir que os sistemas de conhecimento sejam, também, distintos. Por exemplo, e como já apresentado no tópico (1), a conservação da massa é um princípio básico da MC que não se repete na TRR (cujo princípio de conservação, mais amplo, abrange, também, a energia). Isso corrobora o que está sendo defendido nesse tópico.

Do ponto de vista do próprio autor, Vergnaud (1998) apresenta três justificativas para se utilizar o conceito de campo conceitual na análise nas

pesquisas em educação e nos processos de construção do conhecimento científico por parte dos estudantes, a saber:

- (1) Um conceito não se forma a partir de um só tipo de situação, o que sugere a necessidade de se diversificarem as atividades de ensino, em um movimento que permita ao sujeito a aplicação de um dado conceito em diversas situações e de modo a favorecer a integração entre as partes e o todo. A necessidade de diversificação de situações cumpre um papel importante na conceitualização, pois fornece uma base para que os estudantes possam testar seus modelos explicativos em contextos diversos, enriquecendo-os ou reformulando-os.
- (2) Uma situação não se analisa com um só conceito, o que implica na necessidade de uma visão integradora do conhecimento. Atividades didáticas que permitam uma visão generalizante do conhecimento podem contribuir para uma melhor apropriação do mesmo por parte dos estudantes. Trabalhando os conceitos que estruturam um dado campo conceitual, é possível fornecer elementos para que os estudantes construam essa visão integradora sobre o que está sendo aprendido.
- (3) A construção e apropriação de várias propriedades de um conceito ou de múltiplos aspectos de uma situação é um processo longo. É importante, pois, que os diversos patamares que podem ser atingidos pelos estudantes ao longo de sua instrução sejam levados em conta no desenho e na posterior aplicação de intervenções didáticas. Mesmo que incorretos de um ponto de vista científico, tais modelos explicativos podem cumprir um importante papel na trajetória de aprendizagem de um dado sujeito.

Para uma melhor compreensão da TCC torna-se necessário o estudo mais detalhado de alguns de seus componentes básicos, em especial as noções de Invariante Operatório, Conceito e Schème. É o que será feito nas subseções que se seguem.

2.2) Os conceitos-chave da TCC

2.2.1) Os Invariantes Operatórios: conceitos-em-ação e teoremas-em-ação

Por se tratar de uma teoria que se volta para o sujeito em ação, a TCC procura entender as maneiras que permitem (ou não) a abordagem e o manejo satisfatório de situações. Nesse sentido, torna-se necessário compreender o mecanismo segundo o qual um sujeito reconhece, em ação, os elementos pertinentes à solução e constrói relações conceituais entre eles. Esse mecanismo deve conter, portanto, uma base epistêmica, que permite ao sujeito reconhecer a situação como um problema a ser resolvido e propor caminhos que permitam encontrar sucesso na tarefa.

Para fazer isso, é preciso entender que a TCC é uma teoria que procura lidar com o conhecimento ao longo de seu processo de construção. Logo, as situações disponibilizadas pela cultura e as formulações pessoais do aprendiz são dois pilares essenciais. Nesse contexto, Vergnaud afirma que o primeiro ato de mediação didática é a escolha das situações, pois nelas reside o que dará significado aos conceitos (VERGNAUD, 2009b). Essa posição situada para a cognição não nasce em Vergnaud, estando presente na maioria dos trabalhos da psicologia interacionista, como em Piaget, Vigotski e Walon.

A tese central aqui é a de que cada situação incita, no aprendiz, a utilização de um conjunto próprio de schèmes e de conhecimentos e que, portanto, possibilita o desenvolvimento de novos schèmes, de habilidades e de novos saberes que estão contidos em um determinado campo conceitual. Nesse sentido, é necessário que os sujeitos reconheçam nas situações algo passível de ser manejado e que eles possam estabelecer “pontes” ou construir relações com os conceitos provisoriamente estabilizados.

Por isso, sujeitos devem compartilhar algo com a esfera social dos conceitos em um dado campo conceitual, de modo a ser iniciado em suas práticas. Essas construções pessoais são utilizadas em ação pelo sujeito e devem estar, também, disponíveis no domínio cultural como uma série de proposições, relações e significados. Elas são considerados como a ligação entre os domínios subjetivo e cultural pois tanto o sujeito está imerso no domínio cultural quanto a cultura está

“encarnada” nos sujeitos³¹. Na TCC, essas formulações recebem o nome de Invariantes Operatórios (IO) e possuem duas categorias: os conceitos-em-ação (CEA) e os teoremas-em-ação (TEA)³².

A primeira questão essencial ligada aos IO é a maneira pela qual um sujeito se aproxima das situações e procura resolvê-la, sejam elas apresentadas de forma sistemática em um ambiente escolar, por exemplo, ou sejam elas oriundas de situações cotidianas e com menor grau de sistematização.

Como já dito, frente uma determinada situação, é necessário que o sujeito reconheça o domínio de validade dos conceitos que serão utilizados. Esse processo é complexo e se faz por meio de conhecimentos já estabilizados e outros que ainda estão em construção, os objetivos e as metas (propostos pela situação e compartilhados pelo sujeito), as regras de ação (já construídas pelas interações anteriores do sujeito com os objetos) e as possibilidades de inferências (por meio das quais são percebidas propriedades dos objetos e abstraídas para novas situações)³³.

Logo, não é possível reduzir o funcionamento cognitivo de um sujeito a uma única ação ou a um só conceito. No entanto, faremos, nesse momento, um recorte dessa complexidade para explorar aquilo que permite *mais diretamente* a transição entre os domínios cultural e subjetivo. Essa redução se mostrará importante para compreender melhor como a TCC concebe a ação de um sujeito.

Para fazer isso, torna-se necessária a organização de duas instâncias inseparáveis, complementares e distintas, relativas àquilo que é mobilizado pelo sujeito em ação : a pertinência e a correção. As duas categorias dos IO somente serão bem diferenciadas em relação ao papel que cumprem no processo de conceitualização a partir da análise dessas duas instâncias. Além disso, será

³¹ A cultura não se constrói sem sujeitos e não é, tampouco, propriedade de um deles em particular. Assim também pode-se dizer de um sujeito, que se constitui como tal em interação (ou em imersão) com um domínio cultural. Essa dialética sujeito-cultura, portanto, possui dois polos que estão intrinsecamente ligados. Não faz sentido se falar de um, sem se considerar, mesmo que de forma, implícita, o outro.

³² Em alguns dos escritos de Vergnaud, o autor utiliza o termo “conhecimentos-em-ação” como sinônimo de invariantes operatórios.

³³ Mais à frente, essas quatro categorias – conhecimentos, objetivos e metas, regras de ação e inferências – serão agrupadas como pertencentes aos schèmes.

possível mostrar a adequação dessa formulação para a pesquisa em educação em ciências.

Em primeiro lugar, é importante frisar que, na TCC, o processo de conceitualização é ativado pela interação com os elementos das situações e os sujeitos são ativos em seu reconhecimento e operação. Nas palavras de Vergnaud (2013), “o processo de conceitualização é profundamente oportunista porque ele se vale de todas as situações para ocorrer” .

Nesse processo, há duas instâncias que se combinam na ação dos sujeitos. O primeiro pertence ao domínio relacional e pode ser considerado como verdadeiro ou falso a partir da comparação com algum quadro teórico; o segundo nunca poderá ser considerado verdadeiro ou falso, visto que não se vale de proposições ou relações sobre o mundo físico, possuindo, portanto, o estatuto de pertinente ou não-pertinente para a situação que está sendo proposta³⁴. Como será trabalhado a partir deste momento, essas duas categorias são a base da noção de invariante operatório.

Assim é um sujeito em situação. É necessário que ele reconheça os elementos pertinentes para a resolução do problema com o qual se depara. Como o que está sendo trabalhado nesse momento são os conteúdos de pensamento, não se coloca a questão de correção, apenas de adequação ou pertinência. Os conceitos tomados pelo sujeito como pertinentes para uma situação específica, que vão representar a base de suas representações, são chamados de conceitos-em-ação. Essa fase de seleção dos conceitos-em-ação ocorre de forma inconsciente na maior parte do tempo, assim como eles também permanecem implícitos na ação (VERGNAUD, 2009b). Mas, um passo essencial no aprendizado das ciências é o prover situações nas quais os estudantes possam ir tomando consciência de suas escolhas e avaliando os domínios de validade de cada conceito mobilizado.

Outro passo importante, agora ligado à maneira como os conceitos-em-ação se relacionam, é a construção de proposições com eles. Quando colocadas em comparação com determinado quadro teórico de fundo, elas podem adquirir o

³⁴ Essas ideias de pertinência e correção são inspiradas no trabalho do lógico Bertrand Russel sobre funções proposicionais e proposições. O aprofundamento dessas ideias foge aos objetivos desse trabalho. No entanto, é possível saber mais sobre o assunto em : RUSSELL, B. *Introduction à la philosophie mathématique*. Paris : Payot. 1991.

estatuto de verdadeiro ou falso. Essas construções ambientam-se, portanto no domínio dos processos de pensamento e, como tal, também podem permanecer implícitas na ação. As proposições tomadas como verdadeiras na ação dos sujeitos são chamadas por Vergnaud de teoremas-em-ação (VERGNAUD, 2013).

Ao avaliar a maneira como determinado sujeito abordou e propôs soluções para o problema apresentado, é possível inferir quais foram os IO utilizados. Ora, a possibilidade de erro³⁵ na resolução de um problema poder ser devida a diversos processos, dentre os quais, dois são particularmente interessantes para a compreensão da necessária distinção entre as duas categorias de invariantes operatórios: (1) a utilização de conceitos-em-ação que não são pertinentes àquela situação, mesmo sendo verdadeiros os teoremas-em-ação ou (2) a utilização de teoremas-em-ação falsos em uma dada situação, mesmo sendo pertinentes os conceitos-em-ação.

É necessário, portanto, que a análise do sujeito em situação seja feita a partir desse desmembramento nas duas instâncias – pertinência e correção. Isso ocorre porque cada uma delas, isoladamente, é insuficiente para dar conta da complexidade inerente ao sujeito em ação. As duas classes de IO funcionam, portanto, de uma maneira complementar e são irredutíveis uma à outra.

La relation entre théorèmes et concepts est évidemment dialectique, en ce sens qu'il n'y a pas de théorème sans concepts et pas de concept sans théorèmes. Métaphoriquement on peut dire que les concepts-en-acte sont les briques avec lesquelles les théorèmes-en-acte sont fabriqués, et que la seule raison d'existence des concepts-en-acte est justement de permettre la formation de théorèmes-en-acte (propositions tenues pour vraies), à partir desquels sont rendues possibles l'organisation de l'activité et les inférences. Réciproquement, les théorèmes sont constitutifs des concepts puisque, sans propositions tenues pour vraies, les concepts seraient vides de contenu. ³⁶ (VERGNAUD, 2006, p. 12)

³⁵ A noção de erro é estabelecida em relação aos conhecimentos científicos disponíveis em cada cultura, cada quadro de referência, etc...

³⁶ "A relação entre teoremas e conceitos é evidentemente dialética, no sentido que não há teorema sem conceitos e não há conceitos sem teoremas. Metaforicamente, pode-se dizer que os conceitos-em-ação são os tijolos com os quais os teoremas-em-ação são fabricados, e que a única razão de existência dos conceitos-em-ação é justamente de permitir a formação de teoremas-em-ação (proposições tomadas como verdadeiras), a partir dos quais tornam-se possíveis a organização da atividade e as inferências. Reciprocamente, os teoremas são constitutivos dos conceitos uma vez que sem proposições tomadas por verdadeiras, os conceitos seriam vazios de conteúdo." (tradução nossa)

O excessivo acento dado por Vergnaud nessa afirmação de que a única razão de ser dos conceitos-em-ação é a de permitir a formação dos teoremas-em-ação foi reconhecido pelo próprio autor (VERGNAUD, 2013) durante uma reunião de trabalho sobre esta tese. No entanto, é possível compreender que tal acento deve-se à necessária compreensão de que os teoremas-em-ação são construídos em se estabelecendo proposições com os conceitos-em-ação. Evidentemente, que estes últimos se prestam para a retirada de informação tida como pertinente nas ações.

Esse modelo apresentado, por vezes, pode conduzir a uma interpretação errônea que se transformou, também, em alvo de críticas à TCC. Tal interpretação diz respeito ao fato de que o reconhecimento de conceitos pertinentes à uma dada situação implica, de antemão, no estabelecimento de proposições, visto que conceitos são entidades essencialmente relacionais. Dessa forma, não se justificaria a adoção das duas classes de IO que, no fundo, seriam apenas uma. Nesse sentido, a evidente relação dialética entre conceitos e teoremas em ação pode conduzir, nesse caso, à interpretação equivocada de que a pertinência implica em correção e vice-versa.

É bem verdade que, durante a sua ação, determinado sujeito não segue dois passos distintos – de início selecionar conceitos e, em seguida, construir relações. Como já apresentado, a complexidade de um sujeito em situação está relacionada, também, a essa multiplicidade de ações que ocorrem durante a tentativa de resolução de um problema qualquer. A seleção de conceitos tomados como pertinentes e o estabelecimento de proposições são duas ações que ocorrem solidárias durante o enfrentamento de qualquer situação problema. Mas, me parece que essa característica dialética entre conceitos e teoremas em ação não pode ser interpretada como a inexistência das duas categorias, nem na ação dos sujeitos, nem na condução da análise de determinada ação.

É necessário, para se evitar esse tipo de interpretação, que se faça uma análise genética dessa relação que se processa ao longo do desenvolvimento de um sujeito. Desde as primeiras ações dos *schèmes* mais elementares, ocorre um início do desenvolvimento do que virá a se constituir em uma base epistêmica para as operações dos sujeitos (PIAGET, 1977/1936). Nesse sentido, a história das interações com os objetos (do mundo físico, cultural, social, etc.) provê um campo (1) onde vão se construindo as primeiras classificações, (2) para a testagem (mesmo

que inconsciente) das primeiras relações lógicas e (3) para as primeiras construções de significações.

Nesse processo, algumas proposições vão sendo validadas em ação e, com isso, passam a ser utilizadas já como construtos consolidados. Logo, o que já representou um teorema-em-ação pode passar a ser utilizado como um conceito-em-ação, uma vez que determinada forma de agir já tenha se estabilizado.

Por exemplo, as primeiras noções do conceito de força estão associadas a ações involuntárias do bebê sobre objetos próximos (móviles, por exemplo). Essas ações são coordenadas e tornam-se intencionais, em um processo de desenvolvimento que conduz à coordenação de schèmes visuais e sinestésicos. Elas continuam a ocorrer com uma quantidade cada vez maior de objetos e contribuem para o desenvolvimento de um teorema-em-ação que indica que é necessário bater em um objeto para que este adquira movimento (a proposição, neste caso, poderia ser apresentada como “uma força é necessária para produzir movimento”). Nesse ponto, os conceitos-em-ação utilizados são, ainda, rudimentares e relacionados, via de regra, a ações sobre os objetos do mundo físico. Com o passar do tempo e a consolidação desse teorema-em-ação, o agora adolescente passa a usar o conceito-em-ação de força, aglutinando em si as relações conceituais anteriormente consolidadas.

Dessa forma, é de se esperar que os conceitos-em-ação se valham de certas relações, visto que eles consolidam, em determinada etapa do desenvolvimento, algumas das proposições já construídas e aplicadas em situações semelhantes. Para o plano de desenvolvimento atual e futuro do sujeito, o que já fora consolidado representa um ponto de partida e permite, assim, o estabelecimento de novas relações e, portanto, de novas possibilidades de aprendizado.

Dito de outra maneira, se as “proposições tidas como verdadeiras” se mostrarem frutíferas para determinado sujeito, elas são passíveis de serem aplicadas em novas situações, em um movimento crescente de consolidação que pode culminar na sistematização de um conceito-em-ação. Este, por sua vez, será uma das bases para a construção de novas proposições que serão aplicadas em outras situações e por assim em diante.

L'enfant rencontre un grand nombre de tels théorèmes lorsqu'il agit sur le réel et qu'il résout des problèmes dans l'espace, dans le temps,

dans le domaine des quantités et des grandeurs. Ces théorèmes-en-acte ne sont évidemment pas exprimés sous une forme mathématique, ni même parfois sous une autre forme. C'est la raison pour laquelle je les appelle «théorèmes-en-acte». Ils n'ont souvent qu'une validité locale pour les enfants, et sont associés à certaines valeurs des variables, mais c'est là une première base qui pourra être élargie par la suite.³⁷ (VERGNAUD, 1990, p. 10).

Em Vergnaud, esse processo, mesmo que o sujeito não tenha consciência, é um universal, ou seja, há uma maneira peculiar de ação, a despeito de quais sejam os conceitos utilizados, as situações e os sujeitos. Nesse sentido, é pertinente falar em Invariante Operatório, pois não há conceitualização sem a construção de invariantes (VERGNAUD, 2002).

Convém esclarecer, no entanto, que não são as formulações teóricas e/ou as relações entre os conceitos que são invariantes, uma vez que elas estão em constante adaptação às novas situações. É a organização da ação para uma classe de situações que deve ser dita “invariante”, o que remonta à ideia de “*schème*”, que será discutida mais à frente.

2.2.1.1) Primeiro exemplo: sistema de referência

Passaremos, agora, a apresentar dois exemplos. O primeiro é uma nova interpretação de um episódio de interação, apresentado por Wells (2008, pp. 337 e 338) em conexão com dados próprios da pesquisa ora relatada. O segundo, um episódio de uma entrevista conduzida com uma estudante do ensino médio brasileiro (CARVALHO JR, 2005).

Wells (op. cit.) narra um episódio interessante ligado a uma sequência didática onde estudantes planejam, em pequenos grupos, formas para efetuar a medição da passagem do tempo. O projeto do grupo analisado está associado à construção de um relógio de Sol, que irá funcionar a partir do movimento da sombra de um pequeno estilete projetada em um mostrador.

³⁷ A criança encontra um grande número de tais teoremas quando age sobre o real e resolve problemas no espaço, no tempo, no domínio das quantidades e das grandezas. Estes teoremas-em-ação não são, obviamente, expressos em uma forma matemática, ou mesmo às vezes de outra forma. É por isso que eu chamo de "teoremas-em-ação." Eles têm muitas vezes apenas validade local para crianças e estão associadas com determinados valores das variáveis, mas esta é uma primeira base que pode ser estendida em seguida. (Tradução nossa)

A partir dos trabalhos de Galileu, o conceito científico de movimento passou a ganhar um estatuto epistemológico de uma grandeza relativa (GALILEI, 1992). É necessário estabelecer um sistema de referência para afirmar se determinado objeto está ou não em movimento. Em razão disso, a noção de movimento possui um caráter transitivo, ou seja, se um objeto A está em movimento em relação a outro objeto B, este também está, necessariamente, em movimento em relação àquele.

Portanto, a afirmativa de que “é a Terra que se move em torno do Sol” é falsa, uma vez que ela implica na existência de um movimento absoluto. O mesmo erro pode ser verificado na afirmativa contrária: é o Sol que se move em torno da Terra. Uma terceira possibilidade é afirmar que a Terra está em movimento *em relação ao Sol* e que o Sol está em movimento *em relação à Terra*. Essa formulação, de fato, trabalha com a ideia de um movimento relativo, sem a existência de referenciais privilegiados para o estudo dos movimentos. Enfim, a escolha deste ou daquele referencial deve ser feita no sentido de facilitar as observações e o estabelecimento das relações entre os conceitos.

Como assinala Ben Dov (1996), mesmo quando se consideram referenciais acelerados, como é o caso indicado, não se pode afirmar a existência de movimentos absolutos. O autor cita a experiência com um pêndulo, realizada no século XIX por Léon Foucault³⁸, como sendo supostamente uma evidência do movimento de rotação da Terra. No entanto, Ben Dov apresenta o questionamento sobre a irrefutabilidade do experimento de Foucault, afirmando que

No final do século XIX, Ernst Mach, ao criticar os fundamentos da mecânica newtoniana, contestou sobretudo a experiência do balde de Newton³⁹, afirmando que era possível atribuir a concavidade da superfície da água não a um movimento em relação ao espaço absoluto, mas ao movimento da água em relação às estrelas ou ao resto da matéria presente no universo. Mach (...) afirmou que se, mantendo-se o balde imóvel, puséssemos em rotação em torno dele toda a matéria do universo, observaríamos exatamente a mesma concavidade. Da mesma maneira, a experiência de Foucault mostra, na melhor das hipóteses, que o plano de oscilação do pêndulo

³⁸ Foucault pendurou na cúpula do Panteon, em Paris, um pêndulo que podia oscilar durante várias horas. Com o passar do tempo, o plano de oscilação do pêndulo foi se alterando, sugerindo a existência de um movimento real de rotação para a Terra.

³⁹ Newton imaginou um experimento em que um balde cheio de água é posto em rotação. Pouco a pouco, a superfície da água torna-se côncava. Um suposto observador situado no balde, que gira junto com ele, deveria, segundo Newton, afirmar que o conjunto estava, verdadeiramente, em movimento acelerado por ver a superfície da água tornar-se côncava.

permanece fixo em relação às estrelas; ela pode portanto ser interpretada como uma manifestação do movimento das estrelas, a própria Terra permanecendo imóvel. (BEN DOV, 1995, p. 33-34)

Reafirmando essa posição quanto à relatividade do movimento, Einstein escreve “*Sempre foi evidente o fato de que, por seu próprio conceito, todo e qualquer movimento só pode ser concebido como um movimento relativo.*” (2009, p. 53)

Nesse contexto, analisemos o episódio apresentado por Wells (tradução nossa).

Professor: OK, então, o que faz as sombras se moverem?
Lionel: O Sol
Alon: Quando o Sol se move ou a Terra se move
Professor: Bem, qual deles?
Ambos: A Terra se move
Alon: O Sol se mantém em um local e quando ...
Lionel: A Terra. OK aqui está o Sol ... ele vai nessa direção. Se a Terra se move aqui, então ele irá nessa direção
Alon: Não, ele não vai
Lionel: Ah?
Alon: O Sol fica parado em um local. A Terra se move em volta
Lionel: É o que eu disse [permanecem 7 segundos discutindo sobre quem disse o que. Alon, então, faz uma bola representar a Terra em relação à luz do teto]
Alon: O Sol está aqui, ok? E a Terra irá simplesmente ... ela irá girar uma vez a cada vinte e quatro horas. E quando ela gira ... esse é o raio de luz ... ele irá brilhar nesse sentido [indicando a parte da bola que está voltada para a luz] quando ... onde quer que ela gire a luz estará lá.

A pergunta proposta pelo professor não está diretamente associada com a construção de um relógio de Sol, mas com a relação entre movimento/repouso e referencial. O autor apresenta, então, que o conceito em jogo é a relação entre o Sol e a Terra e como isso dá conta do aparecimento do dia e da noite (Wells, 2008, p. 338). Além disso, ele afirma que dizer que o Sol se move é apropriado em conversas

informais, o que confere ao movimento do Sol um caráter de conceito cotidiano. Mas, do ponto de vista da utilização de um conceito científico, o movimento da Terra é que deveria ser utilizado.

A conclusão apresentada por Wells, de que Lionel tem dificuldade de conciliar o movimento da Terra com o funcionamento do relógio de Sol, confirma a interpretação de que o autor defende a existência de um tipo de movimento absoluto – aquele realizado pela Terra – e de outros que são apenas uma impressão – o movimento do Sol, por exemplo.

A própria pergunta enunciada pelo professor (“Bem ... qual?”) carrega, em si, essa distinção de forma implícita. Ao perguntar *qual* das duas situações é verdadeira, o professor induz os estudantes a fazer uma escolha entre as duas possibilidades de interpretação.

O que Wells quis dizer por “the concept at issue here” (Wells, 2008, p.338), em nossa interpretação, é muito próximo do que a TCC nomeia de conceito-em-ação, pois carrega em si um forte componente de identificação do que é relevante para dar conta da situação. No entanto, a análise feita pelo autor pode ser revista do ponto de vista da TCC, uma vez que “the relationship between the Sun and the Earth...” não é, de fato, um conceito. O conceito-em-ação que os estudantes utilizaram, após a pergunta do professor, parece ter sido o de *referencial*. É possível perceber que Alon tentou mostrar (inclusive com objetos físicos) onde ele fixou seu referencial para afirmar que era a Terra que se movia. Dessa forma, é possível inferir que o teorema-em-ação “*o Sol é o referencial privilegiado para analisar o movimento da Terra*” está subjacente em sua atividade.

Porém, para a tarefa que está posta – construir um relógio de Sol – é muito mais adequado que o referencial seja fixado em um ponto da Terra (onde será colocado o relógio) a partir do qual o movimento do Sol seja considerado. Nesse sentido, a “dificuldade” revelada por Lionel pode ter origem em um teorema-em-ação mais complexo – e mais próximo de uma formulação científica – que admite o movimento tendo um caráter relativo. Se assim o for (e não encontramos, nos dados apresentados pelo autor, qualquer objeção a essa interpretação), é possível que ele tenha escolhido a opção mais simples – o movimento do Sol em relação à Terra – não porque ele desconhece o conceito científico de movimento, mas, justamente, porque ele o conhece bem e utiliza – mais do que Alon – seu domínio mais amplo de validade.

Concluindo essa primeira apresentação, pode-se inferir que Lionel utilizou um conceito-em-ação de referencial como um sistema de base para o estudo dos movimentos e de movimento como algo que possui caráter relativo, ligado à mudança de posição, no tempo, tal como visto por determinado referencial. A questão, então, para esse estudante, era a de saber qual referencial adotado simplificaria a tarefa de explicar o funcionamento de seu relógio de Sol.

Outra situação que pode ajudar na compreensão do significado psicológico dos IO é retirada de um debate realizado com os sujeitos da pesquisa ora relatada e versa sobre o mesmo tema do episódio anterior⁴⁰. Esse debate ocorreu durante a quinta aula da sequência didática e está narrado, com mais detalhes, no capítulo seguinte.

Pesquisador: Imagine um ônibus viajando um grande tempo em linha reta e com velocidade constante (a estrada é reta, sem imperfeições). Além disso, as janelas do ônibus são tampadas, o que impede que as pessoas em seu interior olhem para fora. A pergunta é: tente imaginar algum experimento que possa ser feito dentro do ônibus para saber se ele está em repouso ou em movimento.

Antônio: A bola [uma bola que está fixa em um ponto do ônibus] pode ser um exemplo, né ... Ou, se você pedir o motorista prá parar! Se você tiver um solavanco, assim. Isso vai provar que o ônibus tava em movimento. Porque você saiu ... você tava dentro do ônibus. Parado em relação a qualquer outro objeto lá dentro do ônibus. Se você continuar em movimento, isso prova que todo o ... o ... ônibus tava em movimento também.

Pesquisador: Mas o solavanco pode ser causado por uma batida entre um carro e o ônibus, mesmo que este estivesse parado em relação ao chão. Vamos pensar no experimento enquanto o ônibus estiver em situação de inércia.

Antônio: Eu acho que sei. Quando ... igual ... você tacou o giz prá cima. <<Faz menção a uma situação já apresentada pelo professor

⁴⁰ É importante que se diga, no entanto, que os objetivos e os contextos das duas pesquisas são diferentes. A semelhança aqui indicada se refere, apenas e tão somente, à questão da relatividade do movimento.

- anteriormente>> ... aí, quando você tá parado, o giz cai ... reto. E, quando tá em movimento, cai em arco de parábola. Isso podia explicar, né? Porque, se o ônibus estiver mexendo, aí se você tacar o giz, o giz vai cair em arco de parábola. Podia ser?
- Oswaldo: Ah, eu acho que não daria não porque se fosse uma pessoa de fora que visse, ela veria caindo em arco de parábola.
- Antônio: Mas você podia pedir a alguém que estivesse do lado, assim.
- Lara: Mas os dois estão no mesmo sistema.
- Oswaldo: Mas esses dois não percebem porque estão com a mesma velocidade. Mesma coisa com a Terra, então. Se você jogar um giz pro alto, você vai pegar o giz normal. Mas, o que ... a Terra não está em movimento a mesma coisa? Não seria válido esse experimento não!
- Pesquisador: Então, temos duas posições ...
- Antônio: Não! Já concordei com ele ...
- Pesquisador: Bom, então, a pergunta continua ...
- Thales: Eu acho que é ... Como é que você pode afirmar que se você não tem ... é ... as informações necessárias para você tirar uma conclusão. Igual ... você tá dentro do ônibus, fechado ... é a mesma coisa que eu te trancar num quarto todo escuro, fechado ... te boto lá no dia primeiro de ... abril e te tiro no dia 22. Se eu te perguntar a data, se você não tiver como medir, cê vai perder a noção. A partir do momento que você não tem informações necessárias para tirar uma conclusão, cê não pode afirmar nada! Eu acho isso.”
- Cassiano: Talvez não seja porque a gente sempre esteja em movimento?

O conceito-em-ação utilizado pelos estudantes parecem ser, como no caso anterior, o de referencial. Só que o significado epistemológico é distinto para os Antônio e Oswaldo. Enquanto Antônio admite que há um referencial privilegiado, Oswaldo lida com a ideia da relatividade do movimento.

Antônio parece se valer de um teorema-em-ação muito próximo do que utilizara Alon, só que, no caso, o referencial “verdadeiro” está fixo na Terra. Dessa maneira, a questão para ele é investigar o que um observador poderia ver se estivesse fixo nesse referencial privilegiado. O último turno do episódio é um indicativo que Cassiano também utiliza esse tipo de teorema-em-ação.

No entanto, Osvaldo demonstra utilizar um teorema-em-ação ligado ao movimento relativo que o faz perceber que a proposição de Antônio é inconsistente com a proposta do pesquisador e com o princípio da relatividade de Galileu. Interessante de se notar que o teorema-em-ação do movimento relativo é forte o suficiente para sustentar a construção de novos argumentos, pois se o movimento é, de fato, relativo, então é possível expandir a discussão para outras situações. Foi o que Osvaldo fez ao igualar a trajetória que seria vista do giz abandonado dentro de um trem em movimento retilíneo e uniforme e abandonado nas proximidades da superfície da Terra.

Conforme será possível concluir mais adiante, ao longo da análise dos dados da pesquisa, o teorema-em-ação utilizado por Alon, Antônio e Cassiano é comum nas atividades de muitos estudantes. Sujeitos que se valem desse teorema-em-ação têm sempre em vista que há um referencial absoluto que deve ser colocado em algum lugar para o estudo dos movimentos. Em geral, esse lugar é o maior objeto que faz parte do problema. Para o caso de Alon, o Sol. Para Antônio e Cassiano, a Terra.

Por mais que se saiba, do ponto de vista científico, que esse “deslocamento” de um referencial absoluto é, em si, uma certa admissão da possibilidade de um movimento relativo, não é assim que os estudantes encaram os problemas. As suas declarações e a maneira como eles propõem soluções indicam que, para cada situação, há um tipo de movimento real, enquanto que os movimentos percebidos por outro referencial seriam meras impressões.

Há, nesses episódios, indícios importantes de que existe um *schème* de movimento que organiza as ações ligadas aos deslocamentos dos objetos. Nesse contexto, esse *schème* procura identificar um ponto de referência para o estabelecimento do que se desloca e o que permanece em repouso. No entanto, como foi possível perceber, os conteúdos epistêmicos de tal *schème* são diversos e variam entre os sujeitos, o que confere à ação de cada um, um caráter pessoal.

Vamos considerar, nesta pesquisa, a ação desse *schème* em situações que envolvem deslocamentos, medidas de velocidade, trajetórias, etc. Essa será uma das bases de análise que faremos na transição entre os campos conceituais da MC e da TRR.

2.2.1.2) Segundo exemplo: ebulioscópio

O segundo exemplo foi retirado de uma pesquisa realizada com estudantes de ensino médio sobre a distinção entre os conceitos de calor e temperatura (CARVALHO JR, 2005). Essa pesquisa teve como base uma sequência didática aplicada em uma classe de 36 alunos. Após três meses da aplicação dessa sequência didática, houve a condução de entrevistas com 6 desses estudantes. Em uma das atividades da entrevista, os alunos deveriam explicar o funcionamento de um instrumento chamado ebulioscópio: um pequeno recipiente de vidro, totalmente fechado, que contém álcool (ou outro líquido volátil) em seu interior (figura 3).



Figura 3 : O ebulioscópio

Inicialmente, o líquido encontra-se na parte inferior do aparelho. A única comunicação que existe entre esta parte e a superior é por meio de um pequeno tubo de vidro, mostrado em detalhe na figura 4.



Figura 4 : Pequeno cano de vidro que liga as duas partes do aparelho.

Quando a parte inferior do aparelho é colocada sobre a mão de uma pessoa, o líquido volátil se desloca para a parte superior. Isso ocorre porque a transferência de energia da mão do sujeito para o líquido (calor) provoca a vaporização do álcool, o que faz aumentar a pressão exercida sobre o líquido ainda existente. A diferença de pressão do vapor entre a parte inferior e a superior do aparelho faz com que o líquido se desloque para cima.

A seguir, um trecho da entrevista com um dos estudantes.

Pesquisador: A ideia é tentar explicar por que esse líquido sobe.

Ana Paula: Por causa da transferência de calor da minha mão para o líquido.

Pesquisador: O líquido recebe calor?

Ana Paula: É, da minha mão.

Pesquisador: E o que acontece com ele?

Ana Paula: As moléculas se agitam <<nesse momento, a estudante faz um gesto em que suas mãos, inicialmente juntas, vão se afastando quase que horizontalmente e, em seguida, a mão esquerda vai para cima>> e a tendência é subir.

Inferimos que os conceitos-em-ação utilizados por Ana Paula são *calor* como energia transferida entre dois corpos e *dilatação térmica* como um aumento nas dimensões causado pelo aquecimento. Esses estão associados à utilização do teorema-em-ação: "*um corpo aquecido sofre aumento nas suas dimensões*". Nesse contexto, o conceito-em-ação de dilatação parece ter sido decisivo na organização de um teorema-em-ação verdadeiro⁴¹. No entanto, a situação problema não foi resolvida corretamente porque o conceito-em-ação de dilatação não é pertinente à situação.

Esses conhecimentos em ação mobilizados pela estudante permitem a ela gerar novas explicações e fazer, inclusive, inferências sobre resultados de novas situações, como ainda será discutido ser típico da ação dos *schèmes*. A seguir, a continuação da entrevista para que seja possível continuar a análise.

Pesquisador: Então, se eu esfriar em cima, vai acontecer a mesma coisa?

Ana Paula: Se eu esfriar em cima? Não. Desce.

Pesquisador: ((coloca água fria na parte superior e o líquido sobe)). Tudo bem, quando você segurou em baixo, transferiu calor. E aí?

⁴¹ Há situações em que um corpo aquecido sofre uma diminuição em suas dimensões, como é o caso de plásticos, por exemplo. A atribuição dada aqui para esse teorema-em-ação refere-se ao fato de que se trata de um caso geral e que, na situação mostrada, o álcool aquecido sofre, de fato, um aumento em suas dimensões.

Ana Paula: Como essa parte aqui ((a de cima)) está mais fria do que essa ((a de baixo)), faz o líquido subir. Porque quando a minha mão estava em baixo a parte de cima estava mais fria.

Pesquisador: Mas o que motiva isso? Só de falar assim: um está mais quente que o outro. Então, a tendência é subir, está faltando a explicação do fenômeno, né? Porque essa diferença de temperatura está associada à movimentação desse líquido?

Ana Paula: Tem alguma coisa a ver com pressão, ou com o movimento das moléculas.

Pesquisador: Pressão de quem?

Ana Paula: Do líquido... do ar que tá aqui dentro sobre o líquido.

Pesquisador: Então, quando você segura aqui ((embaixo)), onde a pressão é maior?

Ana Paula: A pressão é maior aqui ((embaixo)) e o líquido vai subir pro lugar onde tem menos pressão.

Pesquisador: E se eu esfriar em cima?

Ana Paula: A menor pressão é aqui ((em cima)), aí, ele vai subir também. É isso!

A previsão feita pela estudante de que o resfriamento na parte superior poderia levar ao deslocamento descendente do líquido revela a filiação aos conceitos-em-ação de calor e dilatação, apenas com a utilização do teorema-em-ação já apresentado em sua forma inversa⁴². No entanto, quando a sua previsão não se verificou na prática, a estudante poderia ter duas posições: buscar novas informações pertinentes ao problema e, com isso, construir outras proposições ou manter as informações e alterar somente as relações entre esses conceitos.

O que foi percebido no final da entrevista é um forte indicativo de que a primeira opção foi seguida pela estudante. A partir do reconhecimento de novos fatores que se relacionam na situação, ela construiu novas proposições e, com a ajuda do pesquisador, obteve a explicação correta.

⁴² Se antes, a aluna havia utilizado a proposição “um corpo aquecido aumenta suas dimensões”, neste momento ela parece se valer da proposição “um corpo resfriado diminui suas dimensões”.

Mesmo que a estudante se valesse de conceitos-em-ação pertinentes logo no início da atividade, ainda assim os teoremas-em-ação poderiam estar associados a relações erradas. Por exemplo, a pressão que movimentava o líquido poderia ser creditada à força aplicada pela mão da pessoa e, não, à ação do vapor presente no aparelho. Dessa forma, teríamos conceitos-em-ação pertinentes associados a um teorema-em-ação falso, o que também impediria a estudantes de dar conta da situação.

Essa discussão sobre os IO leva ao estabelecimento de dois marcos na ação do sujeito. De um lado, mais subjetivo, existe a organização interna da atividade que conduz à realização das tarefas – os *schèmes*. De outro, mais cultural, existem as formulações disponibilizadas em um “espaço cultural” ao qual podemos acessar – os conceitos. As próximas subseções serão dedicadas a esses dois marcos.

2.2.2) Os Conceitos

No artigo “Learning to use scientific concepts”, a tese geral defendida pelo autor (Wells, 2008) é que os conceitos não são entidades estáticas que residem nas mentes das pessoas, mas, antes, artefatos culturais que podem ser acessados pelos sujeitos para a resolução de problemas. Essa ideia é forte e encontra eco nas pesquisas recentes sobre conceitualização. A proposição de que *conceitos científicos* são uma parte mais formal dessa cultura e que, como tal, não são universais, mas tem seu *locus* centrado nas situações é, também, algo marcante. Por fim, é também interessante o otimismo revelado pela tese de que

attempting to persuade students to ‘change’ or ‘replace’ the concepts they use through instruction in school is unlikely to be successful unless learners recognize that the proposed alternatives are effective in solving problems that they themselves see as meaningful and significant in relation to their own life concerns.⁴³ (WELLS, 2008, p. 4)

⁴³ "Tentar convencer os alunos a "mudar" ou "substituir" os conceitos que eles usam por meio da instrução na escola é pouco provável que seja bem sucedido a menos que os alunos reconheçam que as alternativas propostas são eficazes na resolução de problemas que eles próprios consideram significativos e importantes em relação a suas próprias preocupações da vida" (Tradução nossa)

Nesse sentido, segundo Wells (2008), há duas posições antagônicas sobre o que seja um conceito. A primeira, derivada de estudos ligados ao movimento de mudança conceitual, admite que os conceitos sejam entidades que os estudantes possuam e que, portanto, devem ser alterados ao longo das atividades de ensino. A outra posição, já explicitada no parágrafo anterior, coloca os conceitos como entidades pertencentes ao domínio das construções culturais.

In sum, in representing their understanding, the concepts that students draw on and use in such acts are world 3 objects, which exist either in external material/semiotic representations, such as diagrams, equations, written texts or spoken words, or internally as memories of occasions when such external representations were previously used by self or others for some particular purpose. But whichever source – external representations or memories of different kinds – is drawn upon to mediate the current problem-solving goal, an active process of construction is required – a transaction between the problem solver, the conceptual tools available, and all the other affordances and constraints of the immediate situation, of which the utterances and actions of other participants are an integral and consequential part.⁴⁴ (WELLS, 2008, p.7)

Dessa forma, os conceitos estão associados aos contextos de seu desenvolvimento e sua aplicabilidade repousa nas situações. De acordo com essa concepção, portanto, os conceitos não podem ser considerados como pertencentes a um determinado sujeito, visto que eles são construções culturais e tem suas formulações parcialmente compartilhadas e utilizadas em determinadas situações. Sobre esse importante aspecto dos conceitos, Wells ainda afirma que

Which conceptual tools are most appropriate on any occasion depends, therefore, on the nature of the problem to be solved. While the design of a vehicle to be powered by a renewable source of energy would certainly

⁴⁴ "Em suma, ao representar o seu entendimento, os conceitos que os alunos extraem e usam em tais ações são objetos do mundo 3, que existem tanto em representações externas materiais/semióticas, como diagramas, equações, textos escritos ou palavras faladas, ou internas como lembranças de ocasiões em que tais representações externas foram utilizados anteriormente por si ou para os outros por algum propósito específico. Mas qualquer fonte - representações externas ou lembranças de diferentes tipos - é extraída mediante o objetivo de resolver problemas atuais, um processo ativo de construção é necessária - uma operação entre o solucionador do problema, as ferramentas conceituais disponíveis, e todos os outros elementos de auxílio ou de restrição da situação imediata, das quais as afirmações e ações dos outros participantes são parte integrante e consequente." (tradução nossa)

require the ability to coordinate the use of a variety of concepts developed in different fields of scientific research, the problem of how best to help customers use and maintain the product they bought would require a different range of concepts, derived from more practically oriented activities. Similarly, while a nutritionist may need to use concepts developed in the field of biochemistry to advise on a healthy diet, a supermarket shopper uses less technical concepts in purchasing the ingredients for the family dinner.⁴⁵ (WELLS, 2008, p.6)

Uma consequência importante para os processos ligados ao ensino das ciências da natureza é a distinção entre o conceito e o processo de conceitualização.

Nesse aspecto, a conceitualização é um processo pelo qual determinado sujeito pode, dentro de uma vasta gama de ferramentas conceituais disponíveis na cultura, ir se apropriando de certos elementos desses conceitos e deixando outros de lado. Esse processo depende, portanto, das situações a que o sujeito foi exposto e das representações que ele foi capaz de construir ao longo da história de seu próprio desenvolvimento.

Sobre esse processo, Vergnaud (2007, p. 229) afirma que

A conceitualização pode ser definida como a identificação dos objetos do mundo, de suas propriedades, relações e transformações; esta identificação pode ser direta ou quase direta, o que resulta de uma construção.

A identificação aqui indicada por Vergnaud deve ser compreendida no sentido dinâmico, ou seja, pela ação do sujeito sobre as situações, procurando os elementos pertinentes para a realização de tarefas e as relações entre esses elementos. Reciprocamente, deve ser também compreendida como a ação do objeto sobre o sujeito, no sentido de promover modificações em seu sistema cognitivo.

⁴⁵ "Os instrumentos de conceituais são mais apropriados em cada ocasião depende, portanto, da natureza do problema a ser resolvido. Embora o desenho de um veículo para ser alimentado por uma fonte de energia renovável certamente exigiria a capacidade de coordenar a utilização de uma variedade de conceitos desenvolvidos em diferentes campos da pesquisa científica, o problema da melhor forma para ajudar os clientes a usar e manter o produto comprado exigiria uma série diferente de conceitos, derivada de atividades de orientação mais prática. Da mesma forma, enquanto que um nutricionista pode necessitar do uso de conceitos desenvolvidos no campo da bioquímica para aconselhar sobre uma dieta saudável, um cliente do supermercado utiliza conceitos menos técnicos para comprar os ingredientes para o jantar em família." (tradução nossa)

Portanto, essa identificação não é uma reprodução no plano intrapsicológico de objetos pertencentes ao mundo físico. É, antes de tudo, uma representação que, portanto, decorre de (re)construções conduzidas pelo sujeito.

É possível, assim, concluir que conceitos, como formulações pertencentes à cultura, não podem ser construtos estáveis residentes nas mentes dos sujeitos. No entanto, o processo de conceitualização demanda um sujeito que compartilhe representações culturais e sobre elas opera, em situações específicas.

Portanto, a operacionalidade dos conceitos e sua profunda filiação a um sistema de significações repousam na possibilidade de serem reconhecidos pelos sujeitos como algo útil e eficaz nas ações.

o objetivo que o adolescente tem diante de si e pode atingir através da formação de conceitos é, sem dúvida, um dos momentos funcionais sem cuja incorporação não poderemos explicar plena e cientificamente a formação de conceitos. É precisamente com o auxílio dos problemas propostos, da necessidade que surge e é estimulada, dos objetivos colocados perante o adolescente que o meio social circundante o motiva e o leva a dar esse passo decisivo no desenvolvimento do seu pensamento. (VIGOTSKI, 2009, p. 171)

Essa característica situada para a conceitualização indica a necessidade de um referencial teórico que abarque as características intra e intersubjetiva em uma formulação para os conceitos. Nesse sentido, não é suficiente que se delimitem os dois planos – subjetivo e cultural – como instâncias necessárias para a conceitualização, mas que haja, também, a proposição de elementos que possam fazer as ligações entre tais planos.

Nesse sentido, concordamos com a observação feita por Bärbel Inhelder de que é necessário rever a tese amplamente aceita de que a formação de conceitos seria devida essencialmente às transmissões sociolinguísticas. De acordo com a autora, “le langage serait une condition nécessaire mais cependant non suffisante de la formation des structures de classe et de relation.”⁴⁶ (INHELDER, 1961, p. 658).

Dessa forma, o fato de que o desenvolvimento de conceitos científicos não ser possível antes de cerca de 12 anos de idade, fato descrito por Vigotski

⁴⁶ “a linguagem seria uma condição necessária mais ainda não suficiente na formação das estruturas de classe e de relação” (Tradução nossa)

(VIGOTSKI, 2009), pode estar ligado ao desenvolvimento ainda insuficiente de estruturas lógico-formais que permitem o estabelecimento de relações causais mesmo na ausência das referências físicas imediatas (PIAGET & GARCIA, 1987). Nesse sentido, conceber o conceito como o “significado da palavra” como propôs Vigotski (2009), mesmo que considerando somente o momento das trocas verbais, como bem delimitou este autor, reduz as possibilidades de compreensão plena do mecanismo de conceitualização.

A formulação dada por Vergnaud (1991a e 2012), parece-me a mais adequada para suprir essas necessidades. Segundo este autor, os conceitos são formados por uma trinca indissolúvel, contendo o conjunto das situações (S), das representações (R) e dos invariantes operatórios (IO). A figura a seguir é uma representação da concepção de conceito em Vergnaud.

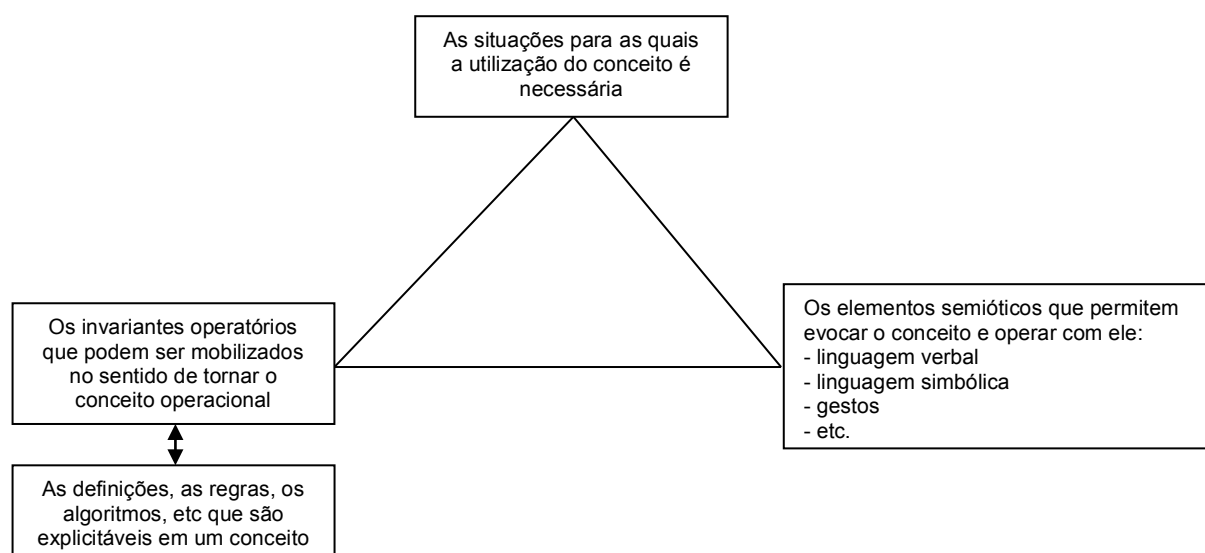


Figura 5 : Relação entre os três domínios que compõem o conceito, de acordo com Vergnaud.

Os tópicos A e B a seguir aprofundarão os dois primeiros conjuntos (situações e representações), visto que o conjunto dos IO já foi apresentado e discutido na seção anterior.

De acordo com a apropriação que se está sendo feita da TCC para o ensino de ciências, consideramos que cada um desses conjuntos que compõe o conceito é irreduzível aos outros e é essencial na sua compreensão como entidade cultural que pode ser partilhada entre determinados grupos.

2.2.2.1) O conjunto das situações

Conforme já indicado anteriormente, uma situação é uma atividade complexa ou uma combinação de atividades mais elementares que um dado sujeito deve resolver. Para conseguir enfrentar a situação, o sujeito necessita dispor dos conhecimentos já construídos e dos que estão em construção, das ferramentas e dos símbolos mediacionais disponibilizados pela cultura, pelo auxílio de pares e de determinadas sequências de procedimentos.

Nesse sentido, Vergnaud (1990, p. 51) afirma que

Dans ses aspects pratiques d'abord, mais aussi dans ses aspects théoriques, le savoir se forme à partir de problèmes à résoudre, c'est-à-dire de situations à maîtriser. On le constate dans l'histoire des sciences et des techniques, également dans le développement des instruments cognitifs du jeune enfant, notamment dans la maîtrise de l'espace et dans la compréhension et la catégorisation des objets usuels.⁴⁷

Esse aspecto dos conceitos é de fundamental importância, porque as situações dão sentido aos conceitos. As situações são, portanto, a porta de entrada da conceitualização. E, conforme já apresentado, o processo de conceitualização é “oportunista”, no sentido de se valer das situações disponíveis para ocorrer.

Mas, para que as situações sejam passíveis de serem enfrentadas e dominadas pelos sujeitos, espera-se que eles sejam capazes de reconhecer os problemas e que tenham recursos suficientes para realizar as ações. É preciso, portanto, planejar as situações que são apropriadas para cada intervenção se quisermos alcançar nossos objetivos, tanto em pesquisas sobre o ensino de conceitos físicos quanto em situações didáticas.

Nesse sentido, Vigotski apresenta uma superlativa contribuição com a sua formulação de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP). Segundo esse autor, a

⁴⁷ Nos seus aspectos práticos, mas também nos seus aspectos teóricos, o saber se forma a partir de problemas a resolver, ou seja, de situações a dominar. Constata-se esse fato na história das ciências e das técnicas, igualmente no desenvolvimento dos instrumentos cognitivos da criança jovem, notadamente no domínio do espaço, na compreensão e na categorização dos objetos usuais. (tradução nossa)

ZDP é a distância entre o que o sujeito consegue fazer sozinho e o que ele só consegue fazer com a ajuda de outro mais capaz (VIGOTSKI, 2009, p. 327). A ZDP pode ser compreendida como o espaço onde as ações de aprendizado tomam forma e, com isso, impulsionam o desenvolvimento cognitivo.

Sobre a ZDP, Vergnaud (2002, s/p) afirma que

Vygotski a eu une idée féconde en parlant de zone de proche développement, mais il n'a pu en donner des exemples concrets faute de disposer d'une description et d'une analyse assez précises des situations et des activités relevant d'une telle zone, qui en outre évolue en permanence. Cette analyse est en effet essentielle, et elle repose sur les concepts et théorèmes sollicités et partiellement disponibles. Un champ conceptuel est un ensemble structuré de classes de situations, dont certaines sont accessibles plus tôt que d'autres, justement parce qu'elles font appel à des schèmes et des théorèmes-en-acte moins sophistiqués. Un concept n'est pas associé à une seule classe de situations, ni à un seul schème, ni à un seul théorème-en-acte. En outre un concept ne se forme pas tout seul mais en relation avec d'autres.⁴⁸

Se as situações apresentadas aos sujeitos forem apenas aquelas que já são totalmente dominadas e estão, de certa forma, sistematizadas, provavelmente não haverá a necessidade do auxílio. Dessa forma, essa situação não irá contribuir para o enriquecimento dos *schèmes* do sujeito pois não haverá desequilíbrio cognitivo. De acordo com Piaget, “ce sont ces déséquilibres qui constituent le moteur de la recherche, car sans eux la connaissance demeurerait statique”⁴⁹ (PIAGET, 1975, p. 18).

Por outro lado, se as situações apresentadas não forem totalmente dominadas pelos sujeitos, sua resolução exigirá que se realizem interações (com os

⁴⁸ Vygotsky teve uma ideia fecunda ao falar de zona de desenvolvimento proximal, mas não conseguiu dar exemplos específicos porque lhe faltou uma descrição e uma análise mais precisa das situações e das atividades sob tal área, que além disso, evolui constantemente. Esta análise é, de fato essencial, e baseia-se nos conceitos e teoremas solicitados e parcialmente disponíveis. Um campo conceitual é um conjunto estruturado de classes de situações, às quais umas estão disponíveis mais cedo do que outras, justamente porque elas dependem de schèmes e teoremas-em-ação menos sofisticados. Um conceito não está associado a uma única classe de situações, nem a um só *schème*, nem a um único teorema-em-ação. Além disso, um conceito não se forma sozinho, mas em relação com outros. (tradução nossa)

⁴⁹ são esses desequilíbrios que constituem o motor da procura, pois sem eles o conhecimento permaneceria estático (tradução nossa).

objetos do meio físico, com os outros sujeitos), o que fará aumentar sua capacidade de agir. A assimilação de novos elementos aos *schèmes* do sujeito provê uma importante característica do desenvolvimento. Por meio do processo de acomodação, tais *schèmes* se tornam mais abrangentes ao final desse tipo de interação.

il faut d'abord signaler un élargissement du champ du système en son extension: dans la mesure où les éléments perturbateurs sont assimilés au schème qui ne pouvait jusque-là s'y accommoder, l'extension du schème est par cela même accrue.⁵⁰ (PIAGET, 1975, p. 37)

Sobre essa possibilidade de desenvolvimento por meio das interações, Vigotski (2009, p. 329) diz que

Afirmamos que em colaboração a criança sempre pode fazer mais do que sozinha. No entanto, cabe acrescentar: não infinitamente mais, porém só em determinados limites, rigorosamente determinados pelo estado do seu desenvolvimento e pelas suas potencialidades intelectuais.

Isso nos leva a concluir, portanto, que as atividades de conceitualização necessitam ser embasadas em situações. Mas, a escolha das situações não deve subestimar nem superestimar as possibilidades dos sujeitos. Situações que estejam aquém da ZDP de um sujeito não contribuem para o desenvolvimento cognitivo. Situações que estejam além da ZDP de um sujeito são inócuas pois não são reconhecidas como tal e, com isso, não conseguem produzir qualquer tipo de desequilíbrio estrutural no sujeito.

Unindo essas ideias, Vergnaud (2007, p. 288) nos afirma que

Si no se desestabiliza a los alumnos, no tienen ninguna razón para aprender. Es verdad también que si se les desestabiliza demasiado, no aprenden más. El principio de adaptación de Piaget funciona muy bien aquí; por otra parte, la idea de desarrollo próximo de Vygotsky, incita a la prudencia.⁵¹

⁵⁰ é necessário em primeiro lugar assinalar um crescimento do campo do sistema em sua extensão : na medida em que os elementos perturbadores são assimilados ao schème que até então não poderia se acomodar nele, a extensão do schème é ainda maior. (tradução nossa)

⁵¹ Se os alunos não são desestabilizados, não têm razão alguma para aprender. É verdade, também, que se eles são desestabilizados em demasia, não aprendem mais. O princípio da adaptação de

Essa ideia de “desestabilização” é a mesma de Piaget nomeou “desequilíbrio” e está no centro do processo de desenvolvimento cognitivo do sujeito segundo a tradição piagetiana (PIAGET, 1975). No exemplo apresentado na subseção 2.2.1.2, sobre a entrevista conduzida sobre o funcionamento do ebulioscópio, quando a previsão que a estudante fez sobre o comportamento do líquido não se verificou na prática, foi necessária uma nova identificação de conceitos pertinentes.

A estudante, então, começou a enunciar alguns observáveis como, por exemplo, os locais em que o aparelho fica mais quente e mais frio: “*Como essa parte aqui [a de cima] está mais fria do que essa [a de baixo], faz o líquido subir.*” A intervenção seguinte do pesquisador ocorreu o sentido de produzir uma organização desses observáveis em um sistema mais complexo. É o que pode ser percebido quando ele pergunta “*porque essa **diferença de temperatura** está associada à movimentação desse líquido?*” Em seguida, a estudante começa a enunciar alguns conceitos que podem estar associados à diferença de temperatura: “*Tem alguma coisa a ver com pressão, ou com o movimento das moléculas.*” Mais uma vez, o pesquisador intervém e pergunta: “*Pressão de quem?*”

Essas intervenções do pesquisador podem ser consideradas como auxílios do “outro mais capaz” para orientar a estudante no sentido de identificar conceitos pertinentes à resolução da situação apresentada. Percebe-se, portanto, que a ação do pesquisador ocorreu justamente na ZDP da estudante, uma vez que ela conseguiu utilizar teoremas-em-ação corretos no âmbito da termodinâmica e, com isso, propor uma explicação correta para o problema apresentado.

Esse melhoramento no sistema cognitivo da estudante não se deve, apenas, à possibilidade de explicar o experimento que, até então, ainda não era possível. De fato, a cada nova situação enfrentada com sucesso, o sujeito passa a dominar um conjunto ampliado de coordenações entre conceitos e teoremas em ação, o que aumenta suas possibilidades de enfrentamento de situações novas e de compreensão do campo conceitual com que opera.

Piaget funciona muito bem aqui; por outro lado, a ideia de desenvolvimento proximal de Vygotsky incita à prudência. (tradução nossa)

2.2.2.2) O conjunto das representações simbólicas

As representações simbólicas englobam as formas semióticas que permitem evocar o conceito em situação, as formas de identificar o conceito, as formulações matemáticas e as definições. Nesse sentido, devem ser considerados os gestos, a linguagem verbal e a linguagem pictórica (imagens, diagramas, gráficos e equações) como representações simbólicas.

Elas nos permitem operar com os conceitos, falar sobre eles, transmitir ideias por meios de signos que são, em essência, construções culturais.

From birth, all infants are surrounded by a multitude of cultural artifacts that, to a considerable degree, determine what can be noticed, investigated, and jointly attended to with caregivers and other members of the immediate community. It is in and through participation in such joint activities, and in the linguistic interaction that is almost always a constituent part of them, that children learn their first language and, in the process, appropriates their community's ways of making sense of experience.⁵² (WELLS, 2008, p.10)

Um exemplo pertinente pode ser encontrado no âmbito das grandezas vetoriais, por exemplo, a força. A representação da ação de uma força agindo sobre um corpo qualquer pode ser feita por meio de um vetor cujo módulo é proporcional à intensidade da força e cuja orientação espacial deve ser a mesma da força que está sendo representada. A figura a seguir mostra uma dessas representações.

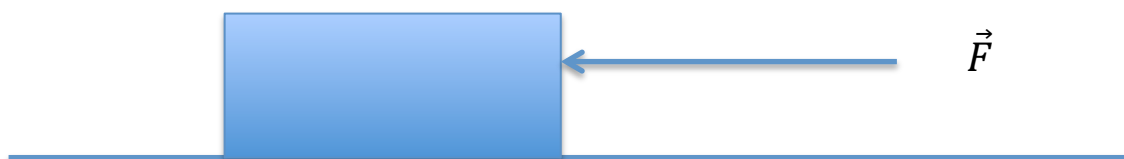


Figura 6 : Representação simbólica de uma força de intensidade F agindo sobre um corpo.

⁵² Desde o nascimento, todas as crianças são cercadas por uma infinidade de artefatos culturais que, em larga medida, determina o que pode ser notado, investigado, e conjuntamente atendidos com cuidadores e outros membros da comunidade mais próxima. É através da participação em atividades em parceria, e na interação linguística que é quase sempre parte delas, que as crianças aprendem sua primeira língua e, no processo, apropriam-se das maneiras pelas quais sua comunidade dá sentido à experiência. (tradução nossa)

Nessa representação, a pequena seta colocada sobre a letra “F” indica que esta representa uma grandeza vetorial. Mas, é relativamente comum os estudantes do ensino médio, por ainda não conseguirem utilizar o conceito de grandeza vetorial, ficarem confusos quanto ao sentido da força aplicada. Afinal, para eles, há dois sentidos representados: uma grande seta para a esquerda e outra pequena, sobre a letra F, para a direita.

Outro ponto importante ligado à representação da força é o fato de que não está indicado, apesar de implicitamente aceito, nem onde está, nem quem é o agente aplicador da força. No caso da figura, tal agente deveria estar à direita do bloco. Como consequência, não se representa, também, a reação da força aplicada, algo que deve ser assumido tacitamente.

Essa percepção extrapola o mero significado da palavra, visto que está associada a uma vasta gama de representações simbólicas (seta como indicativo de um sentido, linha reta como indicativo do solo, letra que indica a força, etc) e de significações que são ativadas pela visualização da figura (conceitos-em-ação de sentido, movimento, força; teorema-em-ação que indica a força como geradora de movimento, por exemplo).

2.2.3) Os Schèmes

Em um artigo intitulado “*de Revault d’Allonnes à une théorie du schème aujourd’hui*” (VERGNAUD e RÉCOPÉ, 2000), os autores apresentam uma interessante evolução do conceito de *schème* a partir dos trabalhos de Revault d’Allonnes, de Janet, Barillet e Piaget. De acordo com os autores, tal conceito tem suas origens em Kant, mas começou a ser desenvolvido de forma operacional em d’Allonnes e teve sua pertinência e amplitude consolidadas em Piaget. Indo além desses marcos, Vergnaud e Récopé mostram algumas questões essenciais a serem consideradas com vistas à construção de uma teoria atual para os *schèmes*.

Essa teoria de *schème* é algo importante para o estudo das representações, da conceitualização e do processo geral do desenvolvimento, mas, segundo Ducret, é algo ainda a ser feito. Na visão de Ducret (2013),

La psychologie génétique a mis en lumière un grand nombre de schèmes accomplissant des fonctions variées (organisation de l’univers de l’action, organisation de l’univers de la pensée, organisation des relations interpersonnelles, schèmes de contrôle ou

de régulation, etc.). À ce jour il n'existe pourtant que des ébauches d'une systématique raisonnée de ces entités et d'établissement d'une théorie des schèmes. Piaget a par exemple montré comment, lors de son fonctionnement, un schème tend à assimiler les éléments de son milieu en leur fournissant du même coup leur signification fonctionnelle, et s'adapte ou s'accommode à leurs particularités.⁵³

Este texto não tem a pretensão de construir tal teoria para os *schèmes*, ou de consolidar as ideias piagetianas sobre o assunto. Essas tarefas seriam por demais extensas e fugiriam ao escopo deste trabalho. Entretanto, julgamos ser necessário e pertinente que se empreendam esforços no sentido de atingir tais objetivos para uma compreensão mais abrangente do sujeito em situação.

O que será feito nesta seção é apenas e tão somente a apresentação dos elementos centrais da noção de *schème* em Piaget como ponto de partida para a melhor compreensão de como Vergnaud se apropriou desse conceito na construção da TCC. Será então possível demonstrar de que maneira a composição entre as noções de *schème* e de conceito em Vergnaud podem se constituir em uma unidade de análise das ações do sujeito capaz de dar conta das dimensões subjetiva e cultural do processo de conceituação.

O recorte escolhido para o início dessa análise – a obra de Piaget – justifica-se pela abrangência do trabalho do epistemólogo suíço e por ser este o primeiro pesquisador a apresentar exemplos concretos da existência, da relevância e da atuação dos *schèmes*.

2.2.3.1) A noção de *schème* em Piaget

É bastante conhecido e aceito o fato de que Piaget começou a utilizar esse conceito como peça fundamental do funcionamento do sujeito a partir dos estudos relacionados ao livro “*La naissance de l'intelligence chez l'enfant*” (PIAGET, 1977/1936).

⁵³ A psicologia genética trouxe à luz um grande número de *schèmes* que acompanham funções variadas (organização do universo da ação, organização do universo do pensamento, organização das relações interpessoais, *schèmes* de controle ou de regulação, etc.). Até hoje, no entanto, só existem rascunhos de uma lógica sistematizada e do estabelecimento de uma teoria dos *schèmes*. Piaget, por exemplo, mostrou como, quando do seu funcionamento, um *schème* tende a assimilar os elementos do seu meio, fornecendo ao mesmo tempo sua significação funcional, e se adapta ou se acomoda às suas particularidades. (tradução nossa)

Mas, é curioso de se notar que Piaget lança mão desse conceito sem apresentar uma definição formal. A primeira aparição do termo se dá desde a página 16, onde Piaget cita diversos tipos de *schème*. Porém, somente no final da obra, já nas conclusões, é que o autor apresenta peças do que poderia ser considerada como uma definição para esse conceito. Fato esse curioso para um pesquisador e escritor tão cioso de sua boa forma de apresentar os problemas, construir metodologias originais para a busca de soluções e organizar as ideias de modo a propor modelos lógicos e coerentes.

Ao invés de apresentar uma definição formal, Piaget opta por trilhar um caminho um pouco diferente, apresentando uma história para o desenvolvimento e a diferenciação dos *schèmes*, além de indicar diversas de suas características essenciais.

Desde o início do livro citado, Piaget já demonstra uma característica essencial ligada aos *schèmes*: há uma *organização* inerente, que é o que lhe permite ser dirigido a uma classe de situações. É por esse caminho que Piaget (1977/1936, p. 16) apresenta o conceito ao dizer que “les schèmes propres à l’intelligence sensori-motrice en général sont d’emblée régis par la loi de totalité, en eux-mêmes et entre eux”.⁵⁴

Em seguida, pode-se encontrar uma análise genética para os *schèmes*. Desde o momento em que o recém-nascido é colocado frente aos objetos do meio físico, ele começa a exercitar seus reflexos, aqui entendidos como uma espécie de “montagem hereditária”, o que permite que cada sujeito se adapte às contingências das situações e aos objetos que lhe são apresentados. Essa interação faz-se, em primeiro lugar, por meio do processo de assimilação, ou seja, da incorporação de objetos externos aos *schèmes* do sujeito.

O encontro com objetos os mais variados e, em grande parte das vezes, não totalmente compatíveis com os *schèmes* do sujeito, torna necessária a existência de um processo complementar à assimilação, associado às modificações produzidas nos *schèmes* a fim de que eles possam abarcar esses novos objetos. Esse processo recebe o nome de *acomodação*.

⁵⁴ os *schèmes* próprios à inteligência sensório-motora, em geral, são primeiramente regidos pela lei de totalidade, neles mesmos e entre eles. (tradução nossa)

Assimilação e acomodação são descritos por Piaget como uma síntese dialética que conduz o sujeito à adaptação ativa às circunstâncias dos objetos do mundo físico (PIAGET, 1977/1936). A adaptação deve ser entendida como ativa porque a ação do real sobre os sujeitos não vai deixar marcas idênticas em todos. Pelo contrário, o sujeito modifica o objeto ao assimilá-lo, indicando que há um processo de significação realizado pelo sujeito. Nesse sentido, a adaptação se faz pela interação sujeito-objeto.

Outro ponto importante a se destacar é a necessidade de um processo de organização, interno ao sujeito, para que todas as modificações conduzidas pelo processo de adaptação façam sentido e sejam operacionais. Piaget considera que os dois processos – adaptação e organização – são os invariantes funcionais que permitem a ligação entre o biológico e o psicológico, ou seja, são os dois componentes que se verificam tanto no funcionamento orgânico quanto no intelectual de um sujeito. Dessa forma, é pertinente se chamar de invariantes funcionais esses dois processos.

Tendo como base esses dois invariantes funcionais do sujeito, é possível compreender o papel que cumprem os *schèmes*. Eles tendem sempre à repetição, que é uma característica essencial do processo de assimilação. Nesse processo, objetos os mais variados são assimilados para aumentar e melhorar o conhecimento do mundo, processo que Piaget chamou de assimilação generalizante ou seja, “l’incorporation d’objets toujours plus variés au schème du reflexe”⁵⁵ (PIAGET, 1977/1936, p. 35). Esse tipo de assimilação se contrapõe à chamada assimilação organizadora, associada a uma espécie de classificação – ou organização – dos objetos que podem ser assimilados.

Dessa forma, a evolução dos *schèmes*, que se dá por meio de diferenciações – quando ocorre um tipo de especialização – ou por coordenações – quando dois *schèmes* são combinados ou um deles assimila o outro – deve estar intimamente ligada à ação do sujeito e à tentativa de acomodar os objetos assimilados aos *schèmes* já existentes.

Destacam-se, portanto, duas grandes características indicadas por Piaget para os *schèmes*: (1) a interação sujeito-objeto organiza-se a partir deles, o que significa

⁵⁵ a incorporação de objetos sempre os mais variados ao schème do reflexo. (tradução nossa)

dizer que, apesar de um *schème* ser construído por determinado sujeito, sua organização atual e futura é função das interações que já ocorreram e que estão ocorrendo entre o sujeito e os objetos do mundo físico; (2) o *schème* é um processo, que envolve um *modus operandi* próprio para cada classe de situações, cuja ontogênese ocorre no sentido de uma especificação progressiva.

Continuando nessa linha de levantamento das características gerais dos *schèmes* em Piaget, uma definição explícita para esse conceito aparece bem mais tarde, no livro “*Biologie et Connaissance*” (PIAGET, 1967b, p. 16).

Nous appellerons schèmes d’actions ce qui, dans une action, est ainsi transposable, généralisable ou différenciable d’une situation à la suivante, autrement dit ce qu’il y a de commun aux divers répétitions ou applications de la même action.⁵⁶

Nesse conceito, percebem-se três características principais para os *schèmes*, que representam uma continuidade – ou um aperfeiçoamento – das ideias originais apresentadas no livro “*La naissance de l’intelligence chez l’enfant*”.

Em primeiro lugar, um *schème* é orientado a uma *classe de situações mais ou menos semelhantes* pois, somente dessa maneira, será possível generalizar alguma ação. Não haveria *schèmes* sem a existência de situações para dar conta delas. Ou, dizendo de outra maneira, os processos filogenético e ontogenético de constituição dos *schèmes* pressupõem a existência de intensa relação sujeito-objeto. Essa categoria nos permitiria, a princípio, classificar os *schèmes* em função da abrangência das situações que poderiam ser atingidas. Assim, aqueles mais globais seriam os pouco diferenciados e, portanto, pouco especializados, mas que, ao contrário, seriam orientados para um grande número de situações. Por exemplo, o *schème* global de sucção possui uma ação muito ampla visto que, nos primórdios do sensório-motor, o “mundo é algo para ser sugado”, ou seja, todos os objetos servem para o seu exercício. É somente nesse sentido que se pode dizer que todas as situações são semelhantes umas às outras para *schèmes* mais globais.

⁵⁶ Nós chamaremos de *schèmes* de ação o que, em uma ação, é dessa forma transportável, generalizável ou diferenciável de uma ação à seguinte, dito de outra forma, é o que há de comum às diversas repetições ou aplicações da mesma ação. (tradução nossa)

Em segundo lugar, os *schèmes* estão ligados ao que se repete na aplicação da ação em classes de situações semelhantes, o que reforça a ideia de *schème* como um processo. Antes de se referir a um automatismo, essa afirmação está ligada à ideia de que o exercício da assimilação (e, portanto, a maneira mesmo como um sujeito conhece os objetos) só é possível a partir da existência de processos que se repetem. Nesse sentido, não é a ação em si que deve ser considerada como sempre a mesma como pode, às vezes, sugerir a ideia de repetição a um leitor inadvertido. A ideia da repetição é a da organização da ação, não da ação propriamente dita. Nesse sentido, conhecer um objeto “implique son incorporation en des schèmes d’action, et cela est vrai des conduites sensori-motrices élémentaires jusqu’aux opérations logico-mathématiques supérieures.”⁵⁷ (PIAGET, 1967b, p. 16).

Por fim e por causa das duas outras características já citadas, os *schèmes* são processos que possuem uma organização interna, própria para cada um deles. Esse processo deve possuir, então, determinada sequência – invariante – de etapas que caracteriza cada tipo de *schème* e um conteúdo – variável – que dá o contexto para o desenrolar da ação.

Les actions se généralisent sous la forme de ‘schèmes’ dont l’organisation se cristallise sous une forme relativement constante, et cette constance relative des schèmes se traduit par la construction d’invariants dans le réel, comme le schème de l’objet permanente qui postule l’existence de substances sous les tableaux perceptifs.⁵⁸
(PIAGET, 1967b, p. 176)

Essas três categorias permitem estabelecer que, durante o processo de desenvolvimento de cada sujeito, a evolução dos *schèmes* está intimamente associada a (1) uma especialização, no sentido de que o processo de diferenciação de *schèmes* permite que cada um deles esteja associado a um grupo cada vez mais específico de situações, mesmo sabendo-se das possibilidades de coordenação e de assimilações recíprocas entre eles, (2) um refinamento das ações, visto que ocorre um progressivo e mais profundo conhecimento dos objetos do meio físico e

⁵⁷ implica sua incorporação aos *schèmes* de ação, e isso é verdadeiro desde as condutas sensório-motoras elementares até operações lógico-matemáticas superiores. (tradução nossa).

⁵⁸ As ações se generalizam sob a forma de ‘*schèmes*’ cuja organização se cristaliza sob uma forma relativamente constante, e essa constância relativa aos *schèmes* se traduz pela construção de invariantes sobre o real, como o *schème* de objeto permanente, que postula a existência de substâncias sob os quadros perceptivos. (tradução nossa).

(3) uma conseqüente melhoria de cada processo, visto que as experiências acumuladas em determinado plano do desenvolvimento são ressignificadas no plano posterior por abstração reflexionante.

Dessa forma, a tese piagetiana da continuidade entre o biológico e o psicológico pode ser percebida no fato de que quanto mais elementar o nível de desenvolvimento psicológico do sujeito, mais indistinguíveis são as diferenças entre os aspectos funcionais da inteligência e os que são herdados por serem próprios da história da espécie.

Nesse sentido, Piaget (1967b, p. 17) apresenta a ideia de que “les schèmes les plus élémentaires auxquels sont assimilées les perceptions sont des schèmes reflexes ou instinctifs, c’est-à-dire héréditaires en une partie importante de leur programmation.”⁵⁹ Mesmo para esses ditos *schèmes héréditaires*, já existe uma parte que não é dada pela programação genética, o que reforça a ideia de que todos os *schèmes* são orientados para as situações, tiram delas seu substrato e são modificados por elas.

Isso não significa dizer, evidentemente, que é o meio – ou que são as situações – que determina por completo as modificações dos *schèmes*. Toda modificação que se possa ali produzir é o resultado do processo de adaptação (equilíbrio entre assimilação e acomodação) e, como tal, comporta as ações do sujeito e do meio. Assim, mesmo os ditos *schèmes* inatos possuem uma história de múltiplas adaptações que já ocorreram ao longo da constituição filogenética da espécie humana.

Na lógica piagetiana, não faz sentido pesquisar o momento exato em que se iniciou determinado *schème*, uma vez que essa constituição demanda uma história de sucessivas diferenciações que, em última análise, poderia retroceder às coordenações nervosas, sendo estas hereditárias. Nesse sentido,

un schème ne connaît jamais de commencement absolu, mais derive toujours par différenciations sucessives, de schèmes

⁵⁹ os schèmes mais elementares aos quais são assimiladas as percepções são os schèmes reflexos ou instintivos, ou seja, hereditários em uma parte importante de sua programação. (tradução nossa).

antérieures qui remontent de proche en proche, jusqu'aux reflexes ou mouvements spontanés initiaux.⁶⁰ (PIAGET, 1967b, p.18)

Esse processo de construção e diferenciação dos *schèmes* está ligado à ideia de continuidade e se relaciona às três categorias já mencionadas.

Se, no início da vida, as “situações mais ou menos semelhantes” às quais os *schèmes* elementares se aplicam são muito diversas (em oposição ao número restrito de *schèmes*), o mecanismo de diferenciação que se processa não extingue em determinado plano o que já foi conseguido no plano anterior. Há, portanto, uma continuidade em relação às situações às quais os *schèmes* se aplicam. Por exemplo, “le schème de la permanence des objets, construit par l'intelligence sensori-motrice, constitue le point de départ des schèmes de conservation opératoire de la pensée, élaborées dès 7-8 ans.”⁶¹ (PIAGET, 1967b, p. 212)

Essa continuidade, por fim, é o argumento central de Piaget para concluir sobre a dependência natural que os *schèmes* mais elaborados têm em relação aos mais elementares.

Si l'on peut passer des schèmes composés de formes à la fois organiques et sensori-motrices, comme les schèmes reflexes et instinctives, à des schèmes proprement sensori-moteurs comme les schèmes d'habitudes il est clair que le passage est également naturel entre ces derniers et ceux de l'intelligence représentative.⁶² (PIAGET, 1967b, p. 211)

Em suma, é possível perceber que os *schèmes* são processos pessoais que permitem aos sujeitos assimilar os objetos para que, com isso, seja possível agir em situação. Em Piaget, esse processo é entendido como um ciclo de transformações que ocorrem à revelia de formulações conceituais específicas e que se especializam

⁶⁰ um schème nunca conhece um começo absoluto, mas sempre deriva por diferenciações sucessivas, de schèmes anteriores que remontam, pouco a pouco, até aos reflexos ou movimentos espontâneos iniciais. (tradução nossa)

⁶¹ o schème da permanência do objeto, construído pela inteligência sensório-motora, constitui o ponto de partida dos schèmes de conservação operatória do pensamento, elaborados a partir dos 7-8 anos. (tradução nossa).

⁶² Se se pode passar dos schème compostos de formas por vezes orgânicas e sensório-motoras, como os schèmes reflexos e instintivos, aos schèmes propriamente sensório-motores, como os schèmes de hábitos, está claro que a passagem é igualmente natural entre estes últimos e aqueles da inteligência representativa. (tradução nossa)

durante o desenvolvimento do sujeito em função de uma história das interações deste com o real.

Um importante resgate do conceito de *schème* ocorreu justamente nas obras em que Piaget realizou uma síntese de sua produção intelectual. A síntese aqui deve ser entendida não somente em um sentido estático, de mera releitura do que já havia sido feita. Mas, sobretudo, a partir de uma perspectiva dinâmica, no sentido de ressignificar seus conceitos-chave para aumentar o poder explicativo e preditivo da teoria.

Segundo Parrat-Dayan (2012 e 2013), essa fase, que abrange o final dos anos 1960 e a década seguinte, começa com o livro “*Biologie et connaissance*”, resgatando a tese da continuidade entre o biológico e o cognitivo, os invariantes funcionais de adaptação e organização e a noção de *schème* e integrando esses conceitos aos utilizados na fase estruturalista.

Os livros dedicados à discussão sobre o possível e o necessário (PIAGET, 1981 e 1983) são especialmente interessantes pois, neles, Piaget sintetiza sua concepção sobre *schème* e a coloca explicitamente de forma solidária ao de estrutura. Tal modelo apresenta uma possibilidade de análise retrospectiva, no sentido de resgatar o que Piaget já havia proposto para tal conceito e, também, uma análise prospectiva, uma vez que o autor mostra novas e promissoras possibilidades de integração *schème* – estrutura para explicar o desenvolvimento cognitivo.

De início, o autor apresenta uma classificação para os *schèmes*: *présentatifs*, *procéduraux* e *opératoires*.

Ainsi tout sujet se trouve en possession de deux grands systèmes cognitifs par ailleurs complémentaires : le système présentatif formé de schèmes et structures stables, servant essentiellement à ‘comprendre’ le réel et le système procédural en mobilité continue, servant à ‘réussir’ donc à satisfaire des besoins par inventions ou transférences de procédures. Il est alors à noter que si le premier de ces systèmes caractérise le ‘sujet épistémique’, le second est relatif au sujet psychologique, les ‘besoins’ étant le propre de sujets individuels et des lacunes qu’ils peuvent ressentir momentanément à la différence de l’incomplétude découverte en une structure lors de sa thématization. Par contre, l’actualisation de tout possible aboutit à un schème présentatif, une fois achevée l’utilisation des schèmes

procéduraux qui y ont conduit, d'où la complémentarité des deux systèmes.⁶³ (PIAGET, 1981, p. 8).

Nessa concepção piagetiana, o sistema operatório, ou seja, o sistema que permite o sujeito agir em situação é devido à combinação dos sistemas *presentativos* e *procedurais*. Percebe-se, nessa obra de síntese final das ideias de Piaget, uma manutenção das três categorias já discutidas anteriormente que são a essência da noção de *schème*. Essa obra apresenta, em relação às demais, uma melhor categorização e organização da maneira determinado sujeito se utiliza dos diversos *schèmes*.

É importante de se considerar que há dois diferentes níveis de ação dos *schèmes*, segundo o entendimento de Piaget nessa época, o que representa uma novidade em relação aos trabalhos anteriores que ele já havia apresentado. Nesse sentido, deve-se entender que, do ponto de vista das ações gerais que permitem a construção dos objetos cognoscíveis pelo sujeito, há uma estreita interação *schème* – estrutura, no sentido de que o primeiro funciona como uma espécie de “braço operacional” da segunda (e, não mais, como uma espécie de andaime⁶⁴).

De um lado, as estruturas dão o suporte necessário (do ponto de vista das possibilidades mais gerais de ação sobre o real) para que, por meio dos *schèmes*, o sujeito possa estruturar o real. Essa seria, portanto, uma função mais epistemológica dos *schèmes*.

⁶³ Assim, todo sujeito se encontra em posse de dois grandes sistemas cognitivos complementares: o sistema presentativo, formado por *schèmes* e estruturas estáveis, que servem essencialmente para “compreender” o real e o sistema procedimental, em contínua mobilidade, que serve para “ter sucesso”, então para satisfazer as necessidades por invenções ou transferências de procedimentos. É, então, de se notar que se o primeiro desses sistemas caracteriza o “sujeito epistêmico”, o segundo é relativo ao sujeito psicológico, sendo as “necessidades” algo próprio de sujeitos individuais e as lacunas que elas podem perceber momentaneamente <<são devidas>> à diferença de incompletude descoberta em uma estrutura quando de sua tematização. Ao contrário, a atualização de todo possível objetivou um *schème* presentativo, uma vez alcançada a utilização dos *schèmes* procedimentais que conduziram até lá, donde conclui-se a complementaridade dos dois sistemas. (tradução nossa)

⁶⁴ A fase conhecida como estruturalista, correspondendo aos trabalhos piagetianos dos anos 1940-1960, é muito extensa e teve um foco muito direcionado à identificação e à compreensão do funcionamento das estruturas cognitivas. Nessa fase, os *schèmes* possuíam uma ação secundária, limitada a momentos em que as estruturas ainda não estavam consolidadas, sendo, portanto, como andaimes para a construção destas.

Por outro lado, ainda resta a questão das histórias pessoais de significação, que se constroem em estreita relação com as situações específicas que fazem parte da trajetória cognitiva de cada sujeito em específico. Essas trajetórias estão em estreita relação com os possíveis reconhecidos pelos sujeitos e da forma como estes foram concebidos. Nesse sentido, há, segundo Piaget, um sistema procedural mais específico e, portanto, mais adaptado às contingências da vida cotidiana. Esse sistema é composto por um conjunto de *schèmes* mais plásticos e, de certa forma, diferentes para cada sujeito, conferindo a cada um certa quantidade de possíveis em cada momento dado. Isso equivale a dizer que, em cada etapa da trajetória cognitiva de determinado sujeito, há uma quantidade de coisas que podem ser dominadas e que essa quantidade difere de um sujeito para outro.

Evidentemente que os dois sistemas funcionam de forma solidária, visto que é o enfrentamento das situações, a despeito do fato de que determinado sujeito obteve ou não sucesso, o material fundamental para a construção dos objetos. Isso significa dizer que a interação entre os *schèmes* procedurais e o real provê a base epistêmica para que possa haver, do ponto de vista epistemológico, a ação dos *schèmes* presentativos. Enquanto que os *schèmes* procedurais são do tipo orientados a objetos, os presentativos são orientados às estruturas. Dessa forma, deve haver uma grande variabilidade nos primeiros, o que confere o caráter pessoal das aprendizagens e das ações dos sujeitos. Por outro lado, essa variabilidade é restrita quando se trata dos segundos.

si le possible procede, d'une part, des victoires obtenues sur les résistances du réel et, d'autre part, des lacunes à combler lorsqu'une variation imaginée conduit à en supposer d'autres, ce double processus relève de l'équilibration sous ses formes les plus générales. Mais tandis que le système des schèmes présentatifs et structuraux est caractérisé par des états d'équilibres momentanés ou durables, la nature propre des possibles ouverts par le système des procédures est au contraire sa mobilité continuelle, renforcée par les transférences sitôt acquis un résultat particulier: on peut ainsi supposer que l'essence des possibles, à la différence du réel et du nécessaire, est d'intervenir dans le processus même des rééquilibrations et de manifester les pouvoirs du sujet avant leurs actualisations, restant naturellement entendu qu'ils ne sont pas prédéterminés, mais se reconstituent sous de nouvelles formes lors de chacune des résistances ou lacunes dont il vient d'être question

donc à l'occasion de chaque perturbation positive ou negative.⁶⁵
(PIAGET, 1981, p. 9)

Discutindo a formação dos possíveis e sua implicação na atualização e expansão de seu modelo de desenvolvimento, Piaget afirma que

la naissance d'un possible presente le double aspect d'une conquête actualisable et de l'acquisition d'un pouvoir tendant à s'exercer et devenant donc source de déséquilibre tant qu'il n'a pas conduit à une nouvelle conquête. Il est vrai qu'en principe on en pourrait dire autant de toute construction cognitive, des schèmes aux structures, et cela dès le comportement animal, constamment motivé par le double besoin d'une extension du milieu et d'un accroissement des pouvoirs de l'organisme sur cet environnement. Mais si cela est general, il reste à opposer à la simple alimentation des schèmes d'assimilation, n'intéressant que leur contenu, les exigences (ou problèmes) de l'accommodation conduisant à des procédures et à des modifications possibles ou obligées des formes eles-mêmes.⁶⁶ (PIAGET, 1981, p. 185)

Nesse sentido, há uma organização geral do sujeito, que se faz por quatro processos: (1) assimilações ao funcionamento imediato e no sentido de obter sucesso nas ações; (2) acomodações igualmente diretas; (3) perturbações positivas

⁶⁵ se o possível procede, de uma parte, dos êxitos obtidos sobre as resistências do real e, de outra parte, das lacunas à preencher quando uma variação imaginada conduz a supor outras, este duplo processo encontra a equilibração sob suas formas mais gerais. Mas, enquanto enquanto que o sistema de schèmes presentativos e estruturais é caracterizado por estados de equilíbrio momentâneos ou duráveis, a natureza própria dos possíveis abertos pelo sistema de procedimentos é, ao contrário, sua mobilidade contínua, reforçada pelas transferências rapidamente adquire um resultado particular: pode-se, assim, supor que a essência dos possíveis, diferente do real e do necessário, é de intervir no processo de reequilibrações e de manifestar as capacidades do sujeito antes de suas atualizações, deixando naturalmente percebido que eles não são predeterminados, mas se reconstituem sob novas formas quando cada uma das resistências ou lacunas que acabaram de ser tematizadas na ocasião de cada perturbação positiva ou negativa. (tradução nossa)

⁶⁶ O nascimento de um possível apresenta o duplo aspecto de uma conquista atualizável e da aquisição de uma capacidade que tende a se exercitar e se transformando, portanto, em fonte de desequilíbrio na medida em que ele não conduz a uma nova conquista. É verdade que, a princípio, poder-se-ia dizer o mesmo a toda construção cognitiva, dos esquemas às estruturas, e também desde o comportamento animal, constantemente motivado pela dupla necessidade de uma extensão do meio e de um crescimento de capacidades [de ação] do organismo sobre este ambiente. Mas, se isso é geral, resta ainda a opo-la à simples alimentação dos schèmes de assimilação, sem importar seu conteúdo, as exigências (ou problemas) de acomodação que conduzem aos procedimentos e às modificações dos possíveis. (tradução nossa)

(obstáculos) ou negativas (limitações e lacunas) que se opõem a (1) e (2) ou tendem a diminuir sua velocidade de ocorrência; (4) compensações que tendem a neutralizar (3) e a atualizar uma nova acomodação que se torna possível pela diferenciação de (2) e se constitui em um começo de um novo procedimento (PIAGET, 1981, p. 185).

Todo o processo descrito está associado aos *schèmes* presentativos e, por isso, associa-se ao funcionamento cognitivo do sujeito. Nesse aspecto, ele se vale de *schèmes* procedimentais, como no caso da etapa (1) ou (4), que organizam ações específicas, ligadas às características mais específicas de cada ação.

Portanto, a dimensão organizadora da ação, seja ela no que se refere ao plano estrutural, seja ao plano da interação com o real, é essencial para que os dois tipos de *schème* possam funcionar. Dito de outra maneira, a concepção final de Piaget sobre o conceito de *schème* preserva a característica central de ser um processo ligado à organização da ação.

Em segundo lugar, a concepção de *schème* apresentada mantém a ideia de uma orientação às situações. É preciso, no entanto, que se compreenda quais são as situações em jogo. Elas podem ser vistas como as que ativam *schèmes* procedimentais, no sentido de se produzirem assimilações, compensações e acomodações ou como as que estão associadas aos mecanismos de abertura e fechamento de estruturas e, portanto, são aquelas ligadas às questões do funcionamento dos possíveis e dos necessários e que engendram os *schèmes* presentativos (PIAGET, 1983, pp. 172 e 173).

2.2.3.2) A noção de schème em Vergnaud

Em Vergnaud, *schème* é visto como uma organização invariante da atividade para uma dada classe de situações. Assim, ele deve ser entendido, na TCC, como uma totalidade dinâmica e funcional, em que seus elementos constituintes trabalham sempre de forma solidária. Dessa definição, resulta uma importante relação: a construção e o desenvolvimento de *schèmes* é um processo profundamente dependente das situações.

Assim, é possível perceber a filiação de Vergnaud às ideias de Piaget, uma vez que o conceito de *schème* continua a apresentar as características de um processo orientado às situações e que possui uma organização interna específica. No entanto, em Piaget, a dimensão conceitual não era tematizada, apesar de ser

essencial. Nesse aspecto, pode-se entender que Vergnaud avança ao propor que há uma base conceitual implícita – os IO – em toda ação inteligente do sujeito.

Plus précisément, c'est une organisation invariante de l'activité pour une classe de situations définie. L'invariance caractérise l'organisation et non l'activité ; le schème n'est pas un stéréotype ; il permet au contraire de traiter la contingence et la nouveauté, ce qui ne serait pas le cas s'il s'agissait d'un stéréotype. S'adressant à une classe de situations, c'est un universel. Pour étudier l'activité des individus, (...) il est donc nécessaire d'identifier les différentes catégories de situations auxquelles ils sont confrontés (...) ⁶⁷. (VERGNAUD, 2012).

Vergnaud retoma uma importante tese piagetiana segundo a qual o conhecimento (ou a inteligência) é adaptação. Essa importante ideia necessita, no entanto, de maior aprofundamento no sentido de torná-la operacional. Nesse sentido, há duas perguntas centrais que devem ser respondidas: quem é que se adapta? e se adapta a que?

A resposta mais imediata poderia ser “o sujeito se adapta ao objeto e este àquele”, como ocorre em Piaget. Mas, há, ainda, a necessidade de saber o *que* do sujeito e do objeto que se adaptam. Vergnaud indica, nesse contexto, que são os *schèmes* que se adaptam às situações. Nesse sentido, a interação sujeito-objeto passa a ser indicada, no âmbito da TCC, como sendo uma interação *schème-situação*.

Como um *schème* é voltado para uma classe de situações, é possível que, ao abordar determinado problema, o sujeito tenha que adaptá-lo às características encontradas. Isso provoca não somente uma alteração estrutural no *schème*, mas também modificações no objeto assimilado. Por isso, a interação *schème-situação* fornece a base para múltiplas influências entre o sujeito e o objeto.

⁶⁷ Mais precisamente, <o schème> é uma organização invariante da atividade para uma classe de situações definida. A invariância caracteriza a organização, não a atividade; o schème não é um estereótipo; ele permite, ao contrário, tratar as contingências e as novidades, o que não seria o caso se se tratasse de um estereótipo. Se endereçando a uma classe de situações, é um universal. Para estudar a atividade dos indivíduos é, então, necessário identificar as diferentes categorias de situações com as quais eles são confrontados. (tradução nossa)

Na obra de Vergnaud, os *schèmes*, como a base do funcionamento cognitivo do sujeito psicológico, devem abarcar, entre outras características, os invariantes operatórios, algo que, se não é negado por Piaget, também não é tematizado. Somente dessa forma, o ciclo das ações do sujeito pode comportar uma dimensão conceitual que o permitirá reconhecer os elementos pertinentes e operar com eles em ação. Além disso, essa necessidade da inserção de elementos conceituais ao conceito de *schème* ajuda a explicar o fato de que, quanto mais avançados no processo de desenvolvimento cognitivo, maior é a diversidade entre os *schèmes* encontrados e as maneiras pelas quais determinado sujeito age em situação.

Mas, esses invariantes operatórios não são os únicos componentes dos *schèmes*. Conforme já apresentado, o foco foi depositado sobre eles nesse trabalho por questões metodológicas relativas ao interesse de pesquisa. Há, no entanto, outras características que se influenciam mutuamente e não operam uma sem a outra. Segundo Vergnaud (2012), esses componentes são

- "un but, ou plusieurs, et le cortège de sous-buts et d'anticipations qui en dérive ;
- des règles d'action, de prise d'information et de contrôle qui engendrent le déroulement temporel de l'activité et de la conduite observable ;
- des invariants opératoires, c'est-à-dire des catégories et des relations permettant de prélever l'information pertinente (concepts en acte), ainsi que des propositions tenues pour vraies (théorèmes en acte). Leur fonction est d'articuler ensemble caractéristiques de la situation, buts, sous-buts et règles ;
- des possibilités d'inférence, qui permettent justement de calculer en situation, hic et nunc, les conséquences des informations recueillies et des propositions tenues pour vraies. Ce calcul reste largement implicite, voire inconscient." ⁶⁸

68

- Um objetivo, ou vários, e um conjunto de sub-objetivos e de antecipações derivadas dele;
- Regras de ação, de tomada de informação e de controle que engendram o decurso temporal da atividade e da conduta observável;
- Os invariantes operatórios, ou seja, as categorias e as relações que permitem recolher a informação pertinente (conceito-em-ação), assim como as proposições tidas como verdadeiras (teoremas-em-ação). Sua função é de articular em conjunto características da situação, objetivos, sub-objetivos e regras;
- Possibilidades de inferência, que permitem justamente calcular em situação, aqui e agora, as consequências das informações recolhidas e as proposições tidas como verdadeiras. Este cálculo permanece amplamente implícito, quando não inconsciente. (tradução nossa)

A maneira pela qual Vergnaud apresenta e utiliza o conceito de *schème*, portanto, guarda grandes semelhanças com a concepção de Piaget. Em primeiro lugar, em ambos os autores percebe-se a ideia de que há algo, no funcionamento cognitivo do sujeito, responsável pela organização da atividade. Isso significa dizer que, em todos os níveis do desenvolvimento, há uma regulação da ação dos sujeitos.

Outra característica em comum entre os dois autores diz respeito ao fato de que os *schèmes* possuem uma orientação específica a uma classe de situações, mesmo que o termo “classe de situações” possa ser algo que possua uma elasticidade suficiente para se adequar à descrição dos *schèmes* que cada autor queira. Essa orientação às situações revela-se, principalmente, pela repetição de certa sequência de ações a elas adaptadas.

Mas, Piaget se interessou mais na construção de um modelo de desenvolvimento para os *schèmes*, sobretudo no que diz respeito aos primeiros anos de vida dos sujeitos. Nesse momento, a dimensão conceitual não é tematizada por Piaget, tampouco a capacidade de gerar inferências, mesmo sabendo que o autor não exclui essas possibilidades. Por exemplo, no *schème* de objeto permanente, percebe-se a inferência sobre a existência dos objetos, mesmo que estes estejam fora do campo perceptual da criança.

O *schème* de Vergnaud é uma peça central da ação do sujeito. As características de organização da ação e de ser um ciclo de transformações são claramente derivadas da noção piagetiana. Por outro lado, o maior detalhamento das dimensões que compõem um *schème* e a atenção aos domínios conceituais específicos representam uma diferença marcável entre os dois autores.

Nesse sentido, o domínio dos invariantes operatórios, utilizado por Vergnaud em sua análise sobre os *schèmes* revela, na nossa avaliação, a maior diferença em relação a Piaget, sem, no entanto, romper com a tradição piagetiana. É possível dizer que a descrição dos invariantes operatórios e o estabelecimento de seu mecanismo de ação representa o que Vergnaud mais avança em relação à análise mais específica da atividade do sujeito em domínios específicos do saber.

2.3) A sistematização

Uma vez apresentadas essas características centrais da TCC, serão discutidos alguns elementos integradores a título de sistematização das ideias e as aplicações no contexto do ensino de Física. Fazendo isso, apresentaremos a proposição de uma unidade de análise que une os aspectos subjetivos e culturais a partir do sujeito em situação.

Os conceitos apresentados na seção 2.2 são as principais chaves de leitura e de compreensão da TCC. Eles apresentam pontos de convergência com diversas outras formulações teóricas.

No que diz respeito à formulação sobre conceito de Wells (2008), o primeiro ponto de convergência a constatar é a diferença entre conceitos como entidades relativamente estáveis (o que ocorre na esfera social) e o processo de conceituação, por meio do qual os conceitos são operados e significados por sujeitos em situações e contextos determinados.

Pelo fato de não serem construções individuais, defende Wells, conceitos não podem ser *alterados* nas mentes dos sujeitos. Nesse sentido, o autor afirma que “concepts are thus collaboratively produced constructs that constitute the realm of ‘what is know’”⁶⁹, para concluir que, como construções culturais feitas pelo homem ao longo de grandes intervalos de tempo histórico, os conceitos podem ir se alterando.

Essa é uma interessante visão desenvolvimentista para os conceitos, e que coloca o aprendizado em ciências como uma “enculturação”, ou seja, aprender ciência não significa possuir conceitos estáticos no interior de uma mente isolada. Pelo contrário, tal aprendizado significa, ao longo de um grande período de tempo, construir instrumentos cognitivos que permitam ao sujeito a utilização consciente dos conceitos disponibilizados por determinada cultura. Essa situação aplica-se tanto para o aprendizado menos formal da utilização dos chamados conceitos espontâneos, quanto para o necessário rigor dos conceitos científicos.

⁶⁹ conceitos são então construtos produzidos em colaboração que constitui o reino do ‘o que é sabido’ (tradução nossa)

Por exemplo, durante meu estágio em Genebra⁷⁰, me espantei por diversas vezes com a quantidade de palavras que são utilizadas para designar o tempo frio e com neve. Alguns conceitos, como o caso de *verglas*⁷¹, não são utilizados no Brasil uma vez que não estão situados no domínio dos eventos e das situações vivenciados. Mas, durante o rigoroso inverno genebrino, o aviso da existência de *verglas* aos motoristas é importante para evitar acidentes. Essa palavra aglutina em si um conjunto de significados e está relacionada com diversas situações e ações que podem ser efetuadas por um indivíduo. Um motorista, viajando em uma estrada suíça, que veja a indicação *verglas* em uma placa, realiza uma série de processos (diminuir a velocidade, tentativa de visualização dos locais da pista menos escorregadios, atenção mais focada, etc.) pois foi capaz de utilizar o conceito em uma situação específica. Provavelmente, um motorista brasileiro em sua primeira viagem pela Suíça, sem conhecer bem o inverno de lá e as condições da estrada, ao ver a palavra *verglas*, não desencadeará a mesma sequência de ações indicadas anteriormente.

Por isso, os avisos de *verglas* nunca são apresentados unicamente com a indicação da palavra, mas são acompanhados um desenho que sugere um carro deslizando. A fotografia a seguir mostra essa indicação.



Figura 7 : Fotografia da placa que indica a ocorrência frequente de verglas.

⁷⁰ Entre os meses de agosto/2012 e julho/2013, realizei um estágio de pesquisa (conhecido como Doutorado Sanduíche) nos Arquivos Jean Piaget – Universidade de Genebra, sob a orientação da Profa. Dra. Sylvia Parrat-Dayan.

⁷¹ O **verglas** é um depósito de gelo compacto e liso, geralmente transparente, proveniente de uma chuva ou de uma garoa em estado de sobrefusão, que se congela ao entrar em contato com uma superfície sólida cuja temperatura é inferior a 0 °C. (extraído de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Verglas>) . Acesso em 10.dez.2012. (tradução nossa).

Mesmo que o sujeito não compreenda o que é um *verglas* ou não consiga ler em francês, é possível que ele compreenda que, na região, há um risco de deslizamento. Dessa forma, a placa funciona como uma representação simbólica do conceito de *verglas*, tendo, portanto, uma característica distinta da definição verbal já apresentada. No entanto, a partir dessa representação simbólica (que pode ser compartilhada por diversos outros conceitos, como, por exemplo, *aquaplanagem*, o que reforça a ideia de Campo Conceitual), podem ser mobilizados conhecimentos (teóricos e práticos) associados à prevenção de acidentes.

Portanto, a questão que é essencial para o processo de conceitualização é: o que permite ao sujeito acessar a cultura e, com isso, utilizar de forma coerente um determinado conceito? Que circunstâncias podem explicar o sucesso ou fracasso na análise do sujeito em ação apoiado por recursos mediacionais diversos, incluindo interação social? Concluindo, se os conceitos são entidades que não estão nos sujeitos, de que maneira é possível a ele uma imersão em um mundo não material e externo a si?

A metáfora que pode ser aqui utilizada é com o sistema disponível atualmente para o armazenamento de arquivos eletrônicos. Os conceitos são como arquivos do tipo abertos que estão disponíveis “nas nuvens” e, por isso, não pertencem a um determinado sujeito. Há uma comunidade colaborativa que trabalha em atualizações para esses arquivos. Quando uma alteração é feita por membros dessa comunidade, os outros membros, por estarem imersos nesse domínio cultural e conhecerem em parte a estrutura do arquivo agora alterado, podem utilizá-lo em novas aplicações (ou nas mesmas aplicações anteriores).

No entanto, para acessar esse arquivo, é necessário que cada sujeito tenha um dispositivo, aqui representado por um instrumento físico (computador, tablet, etc.). A preocupação que nos parece central não é apenas entender a maneira que determinado usuário acessa o arquivo, mas como se dá uma conexão específica e não outra.

O exemplo a seguir, mostra, por meio de uma história em quadrinhos, o domínio de validade de determinados conceitos e como a não observância desse domínio conduz a diferentes interpretações.

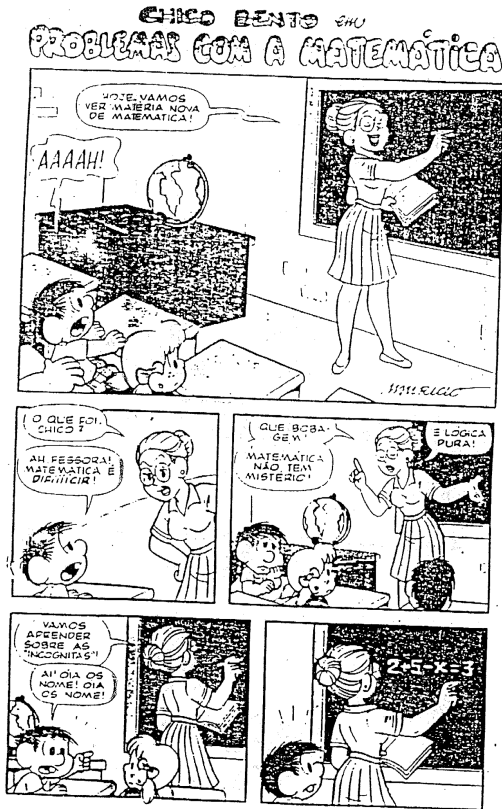


Figura 8 : História do Chico Bento. Revista do Chico Bento, n.224. São Paulo: Globo/Maurício de Sousa, setembro 1995.

Obviamente, a história apresentada é uma alegoria do cotidiano escolar e, portanto, não pode ser analisada como um processo real de interação em sala de aula. No entanto, há diversos elementos que podem ser verificados em algumas intervenções didáticas. Em primeiro lugar, a apresentação de um conceito abstrato (incógnita) desconectado das situações nas quais tal conceito poderia ser aplicado.

Quando o personagem Chico Bento foi colocado frente a um conceito totalmente desconhecido (incógnita), foi-lhe necessário buscar a compreensão a partir de outros conceitos. A professora, então, pronunciou a palavra “valor” de uma incógnita e esse é um conceito já conhecido por Chico. A associação por ele feita (valor = preço pago por alguma mercadoria) é um teorema-em-ação verdadeiro, mas utilizado a partir de um conceito-em-ação não pertinente para a situação (valor monetário). Dessa forma, “calcular o valor de x” continuou, para o aluno, sendo algo sem a devida significação (“a senhora bota o preço que quiser”).

Nesse exemplo metafórico, as representações utilizadas (letra x para representar um valor desconhecido, símbolo de parênteses, por exemplo) não contribuíram para a utilização do conceito, visto que os estudantes não conseguiram estabelecer as relações necessárias. Daí, a tentativa dos estudantes na produção de sentido, buscando aproximações conceituais (parêntese $\leftarrow \rightarrow$ parentes; números primos $\leftarrow \rightarrow$ parentes; números pares $\leftarrow \rightarrow$ casais, etc).

Outra importante ideia a ser discutida é a de que, no contexto da pesquisa em Ensino de Física, é possível acompanhar as alterações produzidas nos invariantes operatórios utilizados pelos estudantes no sentido de inferir o nível das construções conceituais. Essas alterações cumprem um papel de sucessivas aproximações frente a um dado conceito científico. Portanto, a história das alterações dos invariantes operatórios pode revelar importantes elementos para a compreensão de como determinado sujeito internalizou determinadas operações.

A internalização, na ótica de Vigotski, é uma reconstrução interna de uma operação externa (VIGOTSKI, 2009). Nesse processo, uma série de transformações deve ocorrer, no sentido de se conduzir uma passagem do plano interpsicológico para o intrapsicológico. Essa transformação não é direta, mas mediada pelos instrumentos culturais e pela ação do outro. O caminho pelo qual essa transformação ocorre, quais são as possíveis trajetórias cognitivas pelas quais é possível haver a internalização e o que pode ser facilitador ou dificultador desse

processo são perguntas pertinentes que necessitam ser esclarecidas (MARTÍ, 1996).

Acreditamos que a construção de uma explicação coerente para o mecanismo da internalização-externalização pode ocorrer no âmbito da TCC. Para essa explicação há uma necessária releitura do modelo piagetiano da Equilibração (PIAGET, 1975) para que este possa ser aplicado ao estudo das interações de um sujeito em sua ZDP (VIGOTSKI, 2009), ou seja, na esfera das transformações possíveis diante de contribuições que provêm de regulações externas e que vão sendo progressivamente assimiladas no curso da própria ação.

Quando se admite que os teoremas-em-ação e os conceitos-em-ação fazem parte dos conhecimentos contidos nos *schèmes*, é possível compreender que ao abordar as situações, as diversas interações (com os objetos de conhecimento, com os outros, etc.) promovem alterações qualitativas nesses invariantes operatórios. Essas modificações promovidas em microescala indicam pequenas alterações estruturais nos *schèmes*, perceptíveis como o que se chama de aprendizado. Esse processo só pode ser conduzido na ZDP do sujeito e se dá mediante sucessivos desequilíbrios, compensações e reequilibrações majorantes.

No processo de conceitualização, portanto, há uma progressiva identificação entre os invariantes operatórios utilizados pelos sujeitos em ação e aqueles necessários para operar com um conceito científico. Esse processo se dá ao longo de um extenso período de tempo e as alterações conduzidas nos teoremas-em-ação e nos conceitos-em-ação cumprem o papel central no processo de construção de significados por parte dos sujeitos.

A necessidade que os sujeitos tem em acomodar os *schèmes* aos objetos assimilados e a possibilidade de assimilação de objetos não totalmente compatíveis ao *schème* original são algumas das indicações de que a ZDP não é um conceito totalmente externo à psicologia genética. É bem verdade que tal conceito não foi tematizado por Piaget. É o que se pode perceber quando Piaget (1975, p. 16) afirma que

Il arrive constamment qu'un schème A ne trouve pas ses aliments ordinaires A', mais puisse s'accommoder à des termes A'' de caractères voisins a''. Si cette accommodation réussit, le schème A est alors modifié en A2, mais cette nouveauté n'abolit pas l'existence

de A sous son ancienne forme A1, le schème initial A comportant alors simplement la présence de deux sous-schèmes A1 et A2, d'où $A = A1 + A2$.⁷²

Quando as alterações nos invariantes operatórios atingirem uma magnitude significativa, capaz de produzir um salto qualitativo perceptível no nível das possibilidades, das competências e das capacidades, tem-se o que se convencionou chamar de desenvolvimento. A questão da prevalência do desenvolvimento sobre o aprendizado ou o contrário é, para a TCC, uma questão de onde se colocar o marco zero de análise.

Além disso, é possível conceber, como já apresentado e discutido, que os invariantes operatórios carregam em si elementos nos domínios subjetivo e cultural. É por isso que essa noção é tão frutífera, pois apresenta uma possível ligação e continuidade entre os processos internos e externos ao sujeito, sem estabelecer uma fronteira rígida entre eles.

Notadamente há uma interseção entre a concepção dada por Vergnaud para conceito e para *schème*. Ambos partilham os invariantes operatórios. Na figura a seguir, apresentamos uma representação dessa estreita ligação entre os domínios subjetivo e cultural. Conforme já dito anteriormente, esses dois domínios não possuem fronteiras, visto que um deles só adquire funcionalidade na presença do outro.

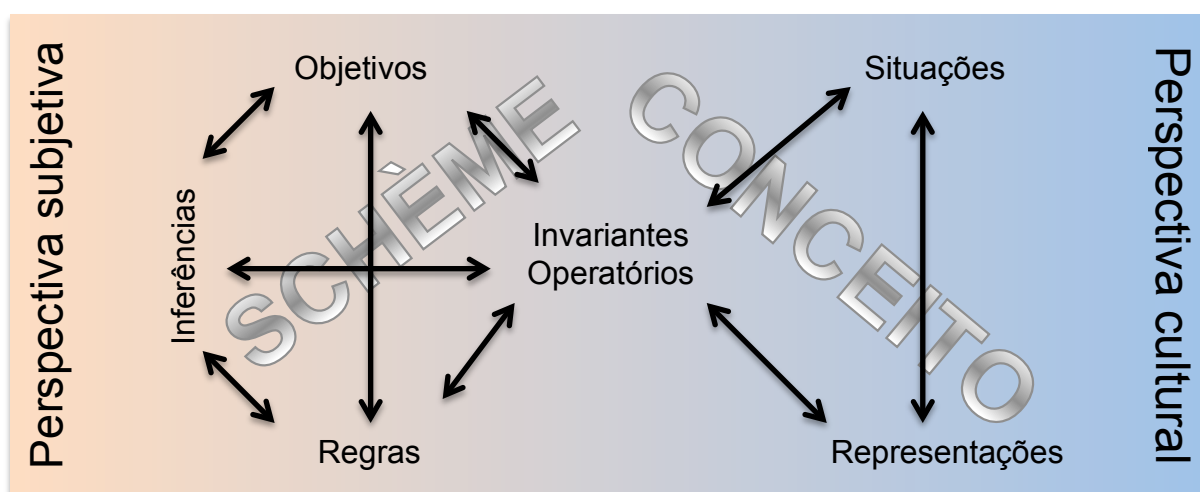


Figura 9 : Representação esquemática da unidade de análise do sujeito em ação.

⁷² Acontece constantemente que um schème A, não encontrando seus alimentos ordinários A', possa se acomodar aos termos A'' de características vizinhas a''. Se essa acomodação der certo, o schème A está, então, modificado em A2, mas essa novidade não elimina a existência de A sob sua forma antiga A1, o schème inicial A comportando então a presença de dois sub-schèmes A1 e A2, de onde $A = A1 + A2$. (tradução nossa)

No desenho apresentado, mostramos o elo entre o domínio subjetivo dos *schèmes* e o domínio cultural dos conceitos a partir dos invariantes operatórios. Cada um desses domínios isoladamente é insuficiente para descrever o processo de conceitualização. Essa é, a nosso ver, a unidade de análise mais básica da TCC, visto que ela é capaz de unir elementos internos ao sujeito aos externos.

É importante frisar que os *schèmes* estão orientados às situações e que estas dão sentido aos conceitos. Mas, do ponto de vista do sujeito em situação, não se pode confundir as duas instâncias. As situações, assim como as representações simbólicas, são disponibilizadas pela cultura e, por isso, não podem ser possuídas pelos sujeitos. Mas, devem ser reconhecidas e representadas (assimiladas) por eles para que haja possibilidade de internalização.

Por outro lado, a identificação de metas, a utilização das regras e a possibilidade de construção de inferências são do domínio do sujeito e não podem ser determinadas exclusivamente pela cultura. Há uma parcela de subjetividade nessas operações, mesmo sendo elas influenciadas ou até desencadeadas pelas situações.

Essas situações podem ser apresentadas de maneira mais formal no domínio escolar por meio de atividades planejadas e implementadas pelo professor. Além disso, é possível que as situações sejam enfrentadas pelos sujeitos sem que haja uma intencionalidade típica dos processos escolares. As interações com os objetos do mundo físico podem se dar de maneira menos formal, a partir da vivência cotidiana. O que há de comum entre essas duas situações é o fato de que as situações - apresentadas de forma mais sistemática ou não - incitam no sujeito a mobilização de *schèmes*.

Dessa forma, é possível concluir que, na TCC, para que um sujeito construa e o desenvolva seus *schèmes*, é necessário o enfrentamento de situações que deem sentido aos conceitos e que haja, nos próprios conceitos, uma parte que não está totalmente “fora do sujeito”, visto que este se encontra em constante interação com os objetos do mundo físico e cultural e, com isso, constrói formas de significação.

Nesse sentido, a concepção de Vergnaud para conceito já apresentada torna-se coerente dentro da TCC, pois os invariantes operatórios estão contidos tanto nos *schèmes* (formando, assim, a parcela intrassubjetiva) quanto nos

conceitos (relacionados à parcela intersubjetiva). É possível, pois, entender os conceitos não meramente como entidades possuídas por determinado sujeito, mas como ferramentas que são produzidas e validadas socialmente, com as quais os sujeitos podem partilhar certos atributos e, com a maturidade e a aprendizagem, podem ir se apropriando dos elementos que os constituem e sendo capazes de operar com sucesso em uma maior variedade de situações.

Esse processo está fortemente associado à ampliação e à diferenciação dos *schèmes*, uma vez que ao se aproximar de certo conceito, operar com ele e aplica-lo em diversas situações, é possível que haja uma alteração dos invariantes operatórios. Essas alterações indicam que os *schèmes* foram modificados e, portanto, podem ser aplicados a novas situações ou estar orientados a formas diferentes de ação para as mesmas situações. Dessa forma, novos elementos podem ser assimilados e acomodados, o que promove novas alterações nos invariantes. Esse movimento de desenvolvimento é contínuo, onde os conceitos aprendidos influenciam nos *schèmes* e estes, naquele.

Então, é a partir da análise dos conceitos-em-ação e dos teoremas-em-ação que os pesquisadores da área de Ensino de Ciências podem avaliar o desenvolvimento conceitual de um determinado sujeito. Sobre essa situação, Vergnaud (1998, p.175) afirma que “conceitos-em-ação e teoremas-em-ação podem progressivamente se tornar conceitos e teoremas científicos reais”.

As análises das trajetórias cognitivas que serão feitas já a partir do capítulo seguinte terão como princípio a unidade de análise indicada. A entrada proposta para a investigação do processo de conceitualização serão os invariantes operatórios, o que permitirá a construção das trajetórias dos sujeitos. Essa será a tônica dos dois capítulos seguintes.

CAPÍTULO 3 – O DESENHO E A REALIZAÇÃO DA PESQUISA

3.1) Local e sujeitos da pesquisa

A pesquisa foi realizada em setembro de 2011 com estudantes da terceira série do Ensino Médio de uma escola pública federal, ligada à Rede Federal de Educação Profissional e Tecnológica, na cidade de Congonhas – MG. Essa escola ainda está em fase de consolidação de seus cursos e oferece, em tempo integral, a formação técnica integrada (ensino médio mais um curso técnico, nas áreas de Mecânica e Edificações).

Por se tratar de uma escola pública federal única na região, há uma grande concorrência nos exames de seleção. Por exemplo, os cursos técnicos integrados têm, em média, cerca de dez candidatos por vaga. A escola recebe estudantes de toda a região e de classes sociais bem diversas, uma vez que há programas de políticas afirmativas orientados para candidatos que cursaram todo o ensino fundamental em escolas públicas. Não há um programa efetivo de acompanhamento das aprendizagens dos alunos, sobretudo para aqueles que apresentam maiores dificuldades. Por isso, a taxa de abandono escolar é muito elevada.

No início do Ensino Médio, as turmas estão sempre cheias, com mais do que a capacidade das salas de aula (40 alunos). Por causa de reprovações e de abandonos, as turmas da terceira série são muito mais vazias. A turma acompanhada nesta pesquisa tinha, quando da realização da pesquisa, 12 alunos, dos quais apenas 9 eram regularmente frequentes. Muitos desses alunos tiveram que sair da escola por motivos financeiros diretos (necessidade de trabalhar para ajudar nas despesas de casa, por exemplo) ou por fraco desempenho escolar.

O local onde a escola está instalada é afastado do centro da cidade, o que torna difícil o acesso. Raras são as linhas de ônibus e os horários são muito escassos. Dessa forma, muitos estudantes permanecem na escola durante todo o dia, fazendo suas refeições na cantina. Não há espaços de lazer e convivência para os alunos que permanecem lá durante o dia.

Todos os professores efetivos da escola possuem dedicação exclusiva, mas não permanecem na escola em tempo integral. Em regra geral, eles permanecem no campus somente durante os períodos em que estão lecionando ou quando há alguma convocação formal.

O perfil dos professores é tão plural quanto o dos alunos. Há os professores da chamada área de formação geral que, em geral, são licenciados em suas áreas específicas de formação. Já os da formação específica (técnica) não possuem, em geral, qualquer formação pedagógica e lecionam somente as disciplinas ligadas aos domínios técnicos. Percebe-se, nos discursos dos dois grupos e em suas atitudes, um sentimento mútuo de desconfiança sobre as atividades realizadas em sala de aula ou fora dela.

Os cursos técnicos integrados possuem uma base comum relativa ao ensino médio regular com todas as disciplinas obrigatórias, inclusive Física, que é ministrada nas três séries. São quatro horas-aula por semana na primeira série e três nas duas outras séries. Não havia um laboratório de Física em funcionamento, visto que o prédio onde ele deveria funcionar ainda não estava concluído. O conteúdo ministrado na primeira série é a Mecânica (Cinemática, Leis de Newton, Energia, Hidrostática e Gravitação); na segunda série é trabalhado o Eletromagnetismo (Eletrostática, Eletrodinâmica e Magnetismo); na terceira série os alunos estudam a Ondulatória (óptica inclusive) e a Física Moderna (tópicos de Física Nuclear, Quântica e Relatividade).

O professor da terceira série é experiente, com mais de 25 anos de magistério no ensino médio. Segundo sua programação estabelecida no início do ano, o curso de Física previa o estudo de Ondulatória no primeiro semestre e Física Moderna no segundo. Devido à ocorrência de uma greve, os alunos ainda não tinham começado a estudar Física Moderna. Dessa forma, a aplicação dessa pesquisa se iniciou na semana imediatamente posterior à do retorno às aulas. Os alunos já tinham estudado, então, uma parcela considerável de todo o programa planejado para o Ensino Médio.

Os alunos que participaram dessa pesquisa, quando cursavam a primeira série do ensino médio, estudaram Mecânica a partir de uma sequência de trabalho pouco convencional. A abordagem feita privilegiava a discussão dos pontos centrais de cada modelo teórico em detrimento de um estudo exaustivo dos conceitos considerados mais “periféricos” e de suas formulações matemáticas.

Dessa forma, a Cinemática não foi ensinada separadamente, como é comum nas escolas brasileiras. Porém, seus elementos centrais foram ensinados ao longo do trabalho com a mecânica clássica. Por exemplo, o conceito de aceleração só foi trabalhado dentro do contexto da segunda Lei de Newton. Assim, garantiu-se

que os elementos-chave da Mecânica, tais como os conceitos de força, energia ou velocidade fossem discutidos em conjunto, em pleno acordo com o que Vergnaud diz sobre a necessidade de diversos conceitos para abordar uma situação e do caráter relacional dos conceitos.

Naquele momento, o estudo da mecânica foi iniciado pela discussão da relatividade galileana e da necessidade da adoção de um referencial para o estudo dos movimentos e para a medição das velocidades. Nessa linha de raciocínio, o princípio da Inércia e a primeira lei de Newton foram discutidos como as pedras angulares de toda a lógica da MC. Isso serviu de ponto de partida para a discussão sobre os limites de validade de uma determinada teoria científica e sobre o papel que cumprem seus modelos explicativos. Em seguida, a partir das limitações da MC, foram apresentadas os postulados de Einstein para a TRR como uma maneira possível de contornar as limitações de então. Como exercício teórico, foram feitas incursões sobre algumas consequências dos postulados da relatividade sobre as noções de tempo e de espaço relativos.

Os alunos que fizeram parte da pesquisa, portanto, já tinham estudado, de forma breve, alguns tópicos da TRR durante o estudo da Mecânica. Além dos postulados da relatividade restrita, foram ensinados a dilatação do tempo e a contração do espaço (na sequência didática indicada no parágrafo anterior) e a relação massa-energia (quando do estudo dos conceitos de trabalho e energia).

Esse estudo havia ocorrido cerca de dois anos e meio antes da aplicação desta pesquisa. No ano seguinte, eles já haviam estudado alguns conceitos de eletromagnetismo e de óptica. Dessa forma, era de se esperar que as situações e os conceitos apresentados ao longo da pesquisa não fossem entendidos da mesma maneira que antes.

Esse movimento didático recursivo nunca representa uma repetição simples para o sujeito que aprende, uma vez que seu repertório cognitivo, seus *schèmes*, seus conhecimentos-em-ação são diferentes do que eram no passado. Pelo contrário, é uma maneira de contribuir para que as situações possam dar sentido aos conceitos em atividades cada vez mais complexas e ricas. Por isso, a crença de que os estudantes poderiam, mesmo que forma inconsciente, utilizar as formulações da TRR quando da resolução de situações-problema.

Isso, de fato, ocorreu ao longo de algumas das atividades da pesquisa. Por exemplo, em uma atividade em que os alunos deveriam, em trios, propor uma

explicação para uma aparente contradição entre a MC e o Eletromagnetismo, os três trios analisados indicaram que a velocidade da luz deveria representar uma espécie de limite, mas nenhum deles explicitou que isso era uma formulação da TRR ou que eles já haviam aprendido esse conteúdo na primeira série. Esse episódio será analisado mais à frente.

Concluindo, a escolha desses alunos para a aplicação da pesquisa deveu-se, em grande parte, à possibilidade de investigar, após um longo tempo, quais foram as modificações nas formas de pensar e de conceber uma teoria Física por parte dos estudantes.

No início do ano de 2011, conduzimos uma pesquisa exploratória sobre a transição entre os conceitos de tempo absoluto e relativo, no sentido de avaliar as situações que seriam apresentadas aos estudantes durante a pesquisa. Ela foi conduzida durante doze aulas de 45 minutos cada, durante o estudo da Teoria da Relatividade. Os sujeitos da pesquisa foram 25 estudantes do primeiro período do curso de Licenciatura em Física da mesma escola onde realizamos a pesquisa, em uma disciplina chamada Leis Fundamentais da Física. Apesar de haver grande diversidade em relação aos perfis dos estudantes, em comum havia o fato de que nenhum deles tinha estudado, formalmente, a teoria da relatividade restrita na escola média.

O pesquisador era o professor responsável pela disciplina citada. Foram organizadas as atividades de intervenção didática por meio de quatro elementos principais: exposições teóricas com a participação dos estudantes; apresentações de vídeos e animações sobre os conceitos de dilatação temporal, simultaneidade e contração espacial; leitura de textos explicativos; resolução individual de problemas abertos. A análise das respostas dos estudantes nos ajudou na construção das situações que seriam utilizadas na pesquisa que foi realizada com os estudantes do Ensino Médio.

3.2) Lugar do pesquisador

Uma questão importante em toda a pesquisa que se desenvolve no cotidiano escolar diz respeito ao lugar do pesquisador. Quais são suas intervenções,

como ele deve proceder e em que medida ele pode interferir nos processos didáticos que estão ocorrendo?

Em primeiro lugar, é importante marcar uma posição a respeito da interferência do pesquisador e de todo o aparato da pesquisa sobre o que está sendo pesquisado. É impossível evitar que tal interferência aconteça porque a presença de uma pessoa externa ao processo pedagógico é sempre um fator de desconforto aos sujeitos da pesquisa, como também é intimidadora a presença de filmadoras, gravadores e microfones.

No entanto, é possível diminuir essas influências por meio de algumas técnicas e algumas posturas que tentamos seguir no desenrolar dessa pesquisa.

O primeiro ponto favorável foi o fato de que o pesquisador não era desconhecido dos estudantes, uma vez que fora o professor da turma quando os alunos cursavam a primeira série do ensino médio. Dessa forma, todos os estudantes já conheciam o pesquisador e eram conhecidos deles.

Todas as medidas tomadas por um pesquisador possuem, também, pontos de tensão. O fato de já ter sido professor dos alunos facilitou em muito a “chegada” em sala de aula, visto que já contava com a confiança dos alunos. Mas, poderia ser um fator complicador para a análise das respostas dos alunos, uma vez que a avaliação pessoal que tinha sobre cada estudante poderia obscurecer o que, de fato, era a atividade desenvolvida ao longo da sequência didática.

Para minorar esse fato, foi realizado o processo de desidentificação dos respondentes. As atividades escritas eram catalogadas e cada estudante recebia um código distinto para cada questão. As análises das respostas eram transcritas para uma tabela onde só constavam os códigos. Após a realização das análises, os nomes dos estudantes eram, então, revelados para a construção de uma primeira versão das suas trajetórias cognitivas em conjunto com os episódios de interação com o professor e entre os colegas.

O segundo cuidado foi o de submeter essa análise a outros pesquisadores. O primeiro interlocutor do trabalho foi o professor Orlando Aguiar Jr., meu orientador, que fazia a leitura dos dados brutos (sem a desidentificação) após a minha análise inicial. Esse olhar foi essencial para avaliar a existência de uma linha lógica entre as propostas das atividades e as respostas dos alunos em especial porque o professor Orlando também possui a formação em Física, além de grande experiência na condução de pesquisas na área de Ensino de Ciências.

A outra interlocução ocorreu ao longo do estágio de doutoramento sanduíche realizado em Genebra e Paris e foi particularmente importante. A apresentação das produções escritas foi feita aos professores Gérard Vergnaud e Sandra Bruno que, com a experiência em análises ligadas à psicologia cognitiva, sobretudo no que diz respeito à TCC, mostraram possíveis interpretações que eram por vezes distintas daquelas que eu havia feito. Além da análise das enunciações dos estudantes, Vergnaud e Bruno me auxiliavam no estabelecimento de relações entre os dados e o meu referencial teórico, a TCC.

Outro ponto que poderia gerar constrangimento aos sujeitos da pesquisa é a presença de câmeras e gravadores no ambiente da sala de aula. Isso pode fazer com que os estudantes se vejam na obrigação de apresentar respostas corretas que podem não ser aquelas que eles queriam fornecer.

Esse não é um problema novo no cotidiano escolar, visto que ele já ocorre nas relações entre professor e aluno. É possível perceber, por exemplo, que algumas respostas apresentadas em exames escritos são muito mais próximas do que os estudantes acreditam ser a resposta esperada pelo professor do que, de fato, suas próprias concepções.

Nesse ponto, acreditamos que a inserção desses elementos o quanto antes na sala de aula pode ser um elemento favorável para minorar os problemas citados. Dessa forma, o projeto de pesquisa foi apresentado aos alunos em fevereiro de 2011 após intenso processo de planejamento junto ao professor (que será tratado na seção seguinte).

Foram feitas cartas para os pais/responsáveis segundo os padrões do Conselho de Ética na Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais (COEP-UFMG). Essas cartas explicavam os objetivos e os procedimentos da pesquisa, bem como os instrumentos de coleta de dados e a confidencialidade inerente ao processo. As cartas, após lidas e aprovadas pelos pais, foram devolvidas com as respectivas assinaturas.

O projeto inicial previa a aplicação da mesma sequência de didática nas três turmas de terceira série da escola para que fosse possível avaliar um maior número de respostas dos estudantes e, com isso, permitir refinar as categorias de análise. Entretanto, só obtivemos a aprovação unânime dos pais/responsáveis em apenas

uma das salas⁷³. Esse processo inicial de obtenção das aprovações se desenvolveu ao longo dos meses de fevereiro e março de 2011.

Somente a partir da segunda quinzena do mês de março é que foi possível a participação no cotidiano das aulas, após consentimento do professor e da Direção da Escola. Durante aproximadamente um mês, minha participação se restringia a observar o cotidiano das aulas, as participações do alunos e, eventualmente, auxiliar os estudantes na realização de tarefas de sala. Os alunos já me viam como professor, o que auxiliou sobremaneira a inserção no ambiente da sala de aula. Em momentos pontuais, o professor solicitava algum auxílio na realização de experimentos ou na explicação de atividades em grupos de alunos.

A partir do mês de maio deu-se o início da utilização da filmadora e do gravador em sala de aula. Inicialmente, para registrar pequenos trechos da explicação do professor ou da interação entre os alunos. Como já era de se esperar, houve um constrangimento inicial ao fato de ser filmado, mas essa situação foi se tornando mais comum com o tempo.

Por fim, fazia algumas perguntas dirigidas aos alunos e registrava as respostas, como se fosse um processo de entrevista. As perguntas eram relacionadas aos conceitos que estavam sendo trabalhados pelo professor. Por exemplo, quando o professor trabalhava com a formação de eclipses lunares, ao final da aula, propus a seguinte situação⁷⁴:

T01: Pesquisador: Vocês já viram, quando você está em um carro, à noite, e a Lua parece te seguir?

T02: Estudantes (vários): Sim.

T03: Pesquisador: Então, é legal, né? Mas, porque isso acontece? A Lua te segue?

T04: Nayara: Ah ... eu acho que sim! <<risos>>

T05: Lara: É o que a gente vê.

T06: Antônio: Será?

T07: Pesquisador: Imagine que há dois carros que se movem na mesma estrada em sentidos contrários. Você está em um carro e seu amigo em outro. A quem a Lua irá seguir nesse caso?

T08: Nayara: A mim!

T09: Osvaldo: As duas pessoas, eu acho. Tipo ... cada um vai ver a Lua te seguindo ... os dois ... tipo... cada um vê uma coisa.

⁷³ A sequência didática foi aplicada nas três turmas, pois fazia parte da programação do professor. No entanto, o acompanhamento da pesquisa só ocorreu em uma turma.

⁷⁴ Todos os nomes utilizados ao longo desta tese são fictícios.

T10: Vívian: É aquele negócio ... depende do referencial ... Acho que os dois vão ver <<a Lua>> seguindo.

É possível perceber que os alunos já estão mais à vontade e tentam responder ao que foi perguntado pelo pesquisador.

Pouco depois desse momento, quando o professor havia terminado a unidade de Ondulatória, a escola entrou em greve e os trabalhos só foram retomados no final do mês de setembro, quando a pesquisa começou a ser aplicada. Infelizmente, não havia mais tempo para um novo período de adaptação e tive que partir diretamente para a aplicação da pesquisa. Analisando o comportamento dos estudantes não foi possível perceber desconforto frente ao processo de coleta de dados.

3.3) Planejamento das atividades

As atividades de pesquisa ocupam um lugar distinto daquele relacionado com a ação docente. Nesse ponto, o professor se interessa em construir atividades de intervenção didática que permitam o aprendizado de formas consagradas de pensamento conceitual em um dado campo de conhecimento e em avaliar essas aprendizagens. Portanto, o professor possui uma referência ligada ao acerto e ao erro, balizados por esse conhecimento de campo, que regulam, de certo modo, as práticas de significação em sala de aula. Evidentemente, o professor se preocupa, também, com o processo de aprendizagem, mas ele deve zelar pelo resultado desse processo.

Por outro lado, o pesquisador se preocupa em avaliar os processos que levaram determinado sujeito a apresentar tal resposta e a ligação entre essa resposta e as situações.

É bem verdade que tanto o professor se interessa pelos processos quanto o pesquisador tem a referência no acerto/erro. Mas, os focos são distintos e essa tensão deve ser levada em conta quando se pretende trabalhar com atividades de intervenção em sala de aula. Um processo mais ligado aos interesses do pesquisador pode tornar a atividade do professor um pouco artificial e, portanto, sem a profundidade necessária para compreender as situações de ensino e aprendizagem no domínio escolar. Por outro lado, se estiver por demais centrado na

lógica do professor pode inviabilizar os interesses de pesquisa e se aproximar apenas dos rituais da escola.

Com tal motivação, procuramos (eu e o professor) construir uma metodologia de trabalho que, respeitando o estilo do professor, seus interesses e sua forma de abordagem da Física, desse suporte à construção dos dados que necessitava. Uma primeira preocupação foi a de conhecer a programação anual planejada pelo professor, no intuito de avaliar quais seriam os impactos da pesquisa sobre a dinâmica da turma.

Nesse sentido, estava planejado o trabalho com a Teoria da Relatividade Restrita a partir do segundo semestre. De acordo com o planejamento do professor, esse tópico seria assim trabalhado: 1. Postulados da Relatividade ; 2. Simultaneidade ; 3. Dilatação Temporal ; 4. Contração Espacial ; 5. Relação Massa-Energia ; 6. Aplicações : fissão, fusão, aniquilação de pares.

O próximo passo foi o de discutir com o professor a maneira como ele havia pensado para explorar o tema, ou seja, qual a sequência dos trabalhos, quais textos, como introduzir as discussões e a partir de quais pressupostos. Nesse momento, apresentei a necessidade de se fazer um resgate das noções de relatividade do movimento para conduzir à construção do tempo relativo. Narrei, então, como havia feito o trabalho quando os alunos estavam na primeira série e as experiências obtidas na aplicação do estudo exploratório de 2011 com estudantes da Licenciatura. Esse modelo de ensino foi abraçado pelo professor.

O planejamento das aulas foi pensado, então, para comportar atividades de exposição por parte do professor, resolução de problemas e discussões com a turma e entre pequenos grupos. O momento de cada atividade foi sugerido por mim e aceito pelo professor. Dessa maneira, organizamos juntos a seguinte sequência de trabalho.

Apresentação dos fundamentos da Mecânica:

Nessa primeira unidade, o ponto central é a relatividade do movimento e suas consequências. A apresentação fica a cargo do professor, que faz uma exposição sobre movimento, repouso, trajetória, velocidade, aceleração e força e apresenta os princípios da relatividade de Galileu e da Inércia. Utilização de discussão com a turma, resolução de problemas e apresentação de vídeos.

Identificação dos pontos de tensão entre os campos conceituais da Mecânica Clássica e do Eletromagnetismo:

A partir de duas situações importantes (inconsistência da equivalência entre referenciais inerciais no eletromagnetismo e a aplicação de forças magnéticas por um fio condutor percorrido por corrente elétrica), mostrar que resultados previstos pela MC são inconsistentes com o Eletromagnetismo. Em seguida, trabalhar com tentativas de explicar as inconsistências.

Apresentação dos postulados da TRR como uma possível resolução dos problemas anteriormente discutidos:

Em resposta ao problema da incompatibilidade entre MC e Eletromagnetismo, apresentar os postulados da relatividade e explicar o significado de cada um, com exemplos, Trabalhar com a relatividade da simultaneidade. Utilização de animações sobre os conceitos trabalhados.

Discussão sobre as consequências dos postulados da TRR :

Mostrar, a partir do postulado que indica a constância da velocidade da luz, que adotar intervalos de tempos ou comprimentos distintos para diferentes referenciais é uma imposição lógica que pode ser, inclusive, deduzida. Trabalhar com tais consequências na análise de situações. Em seguida, trabalhar com a relação massa-energia, valendo-se de abordagem semelhante.

As atividades de pesquisa ficaram a cargo do pesquisador, ou seja, todas as questões propostas aos alunos no sentido de avaliar os IO foram organizadas pelo pesquisador e entregues para que o professor as distribuísse aos alunos. Relativamente ao interesse desta pesquisa, o recorte feito foi o de acompanhar as produções dos estudantes até o trabalho com a dilatação temporal. Após esse momento, o professor continuou a trabalhar com a TRR, mostrando a contração espacial, a relação massa-energia e os processos de fissão e fusão nucleares.

Um resumo das atividades realizadas e suas respectivas durações pode ser visto no quadro a seguir.

Aula número	Duração	Descrição	Objetivos
1	100 min	Apresentação dos conceitos-chave de referencial, partícula, movimento, repouso e trajetória.	Fornecer o contexto para as discussões que serão conduzidas a seguir; apresentar situações nas quais é necessário o uso do conceito de relatividade do movimento.
2	50 min	Resolução individual da Primeira atividade de classe	Investigar os conhecimentos-em-ação utilizados pelos estudantes frente a situações em que a noção de relatividade do movimento é necessária; analisar, com a ajuda dos episódios da primeira aula, as representações já construídas e aquelas em construção sobre o conceito de referencial.
3	50 min	Apresentação de 3 vídeos que exploram, a partir de pontos de vista distintos, o conceito de referencial; Resolução individual da Segunda atividade de classe, que explora a relatividade do movimento.	Apresentar diversas situações e representações nas quais o conceito de referencial pode ser explorado; investigar como os estudantes organizam seus esquemas e suas representações para reconhecer o conceito de referencial em situações e como resolvem tais situações.
4	100 min	Apresentação e discussão do conceito de força e inércia. Aplicação do princípio da inércia como um elemento central da lógica da Mecânica Clássica.	Discutir a indistinguibilidade, na MC, entre o repouso e o movimento retilíneo uniforme; aplicar essa noção para reconhecer alguns dos limites da MC; iniciar a discussão sobre a emergência da TRR.
5	50 min	Debate entre professor, pesquisador e estudantes; Tratamento de várias situações, desde a concepção dos estudantes sobre o que seria o trabalho de um cientista até as representações sobre os assuntos já estudados.	Sistematizar os conceitos estudados em um quadro mais amplo, capaz de permitir a análise de novas situações mais complexas; analisar as representações dos estudantes sobre o funcionamento da ciência e como os cientistas produzem conhecimento.
6	50 min	Resolução, em trios, da Terceira atividade de sala. Essa atividade apresenta situações nas quais o modelo da MC não é mais satisfatório.	Analisar os argumentos utilizados pelos estudantes na construção de explicações sobre situações que demandam o modelo da TRR; analisar os conceitos-em-ação que os estudantes lançam mão para resolver situações complexas.
7	100 min	Apresentação e explicação dos postulados da TRR; Resolução individual da Quarta atividade de classe, que explora aplicações diretas dos postulados da TRR.	Discutir a forma como Einstein formulou seu modelo explicativo para a inconsistência entre a MC e o Eletromagnetismo; explicar os postulados da TRR; investigar a adesão dos estudantes a esse modelo; analisar os conhecimentos-em-ação mobilizados pelos estudantes frente à situações em que a validade do modelo clássico é posta em questão.
8	100 min	Exibição de vídeos sobre uma das noções mais importantes da TRR, o conceito de simultaneidade. Resolução, em trios, da quinta atividade escrita.	Investigar como os estudantes organizam seus conhecimentos-em-ação para resolver problemas envolvendo, indiretamente, a relatividade do tempo; analisar o estatuto epistemológico dos argumentos utilizados pelos estudantes para justificar a relatividade da simultaneidade.
9	100 min	Dedução da dilatação temporal a partir do segundo postulado da TRR; aplicação dessa consequência para o estudo de alguns casos exemplares, como o paradoxo dos gêmeos.	Apresentar novas situações para dar sentido ao conceito de tempo relativo; discutir a necessidade de se utilizar tal conceito em situações cotidianas; analisar formulações conceituais construídas a partir de postulados.
10	50 min	Resolução, individual, da sexta atividade de sala nos primeiros 50 minutos;	Investigar os conceitos-em-ação utilizados pelos estudantes para abordar situações que envolvem o conceito de tempo.
11	50 min	Resolução, individual, de uma questão sobre a dilatação do tempo	Avaliar, após algum tempo, os conhecimentos-em-ação mobilizados pelos sujeitos

Quadro 1: Resumo das atividades realizadas na pesquisa.

3.4) A realização da pesquisa

A realização da atividade de intervenção didática foi conduzida ao longo de 16 horas-aula de trabalho, distribuídas em 11 encontros, seguindo o horário das aulas de Física da turma. Havia, nesse processo, aulas simples e duplas, como mostra o quadro anterior.

As exposições feitas pelo professor foram filmadas por duas câmeras, uma delas fixa no professor e a outra voltada para os estudantes. Nas atividades de discussão, os grupos foram filmados, com uma câmera para cada grupo. Nas atividades individuais de resolução dos problemas, apenas uma câmera foi utilizada, focando toda a turma. Dessa forma, somando-se os registros de todas as câmeras, obtivemos um total de 28 horas, que foram analisadas e, quando necessário, transcritas.

Ao longo da sequência didática, houve sete momentos de resolução de problemas abertos, que foram recolhidos para análise. Dessas produções, duas foram feitas em grupo e as outras, individualmente.

O critério utilizado para estabelecer as atividades foi o seguinte: sempre que os conceitos e/ou as situações já eram conhecidos pelos estudantes por se tratar de discussões conduzidas pelo professor, as atividades eram feitas individualmente; para as situações que representavam novidades e, portanto, exigiam maior capacidade de extrapolação, as atividades eram feitas em trios.

Esse conjunto de atividades permitiu a avaliação dos IO utilizados pelos sujeitos e conduziu à resposta às perguntas centrais da pesquisa, que eram: *“de que maneira os estudantes organizam seus conhecimentos-em-ação para construir a noção de tempo relativo e como utilizam essa noção para reconhecer as situações onde ela é necessária para resolver os problemas apresentados?”*

As aulas tiveram um forte caráter de exposição por parte do professor, que buscava, no entanto, um diálogo com os estudantes, procurando em vários momentos solicitar aos estudantes que apresentassem suas ideias para o debate. Em outros momentos, a participação dos estudantes era incentivada mais no sentido de reforçar as ideias apresentadas. Ainda em outros momentos, o professor apenas buscava saber se os estudantes tinham compreendido os conceitos apresentados. As exposições eram intercaladas com apresentações de vídeos e animações sobre os conceitos apresentados.

Ao longo dessas exposições, eram apresentados os problemas abertos para a investigação de como os sujeitos utilizam seus *schèmes*, para propor soluções e encontrar caminhos para a resolução.

Para que fosse possível avaliar os conceitos e teoremas em ação utilizados pelos estudantes, foi necessária a construção de situações-problema para serem resolvidas por eles. Tais situações eram problemas abertos, do tipo lápis e papel, que abordavam os conceitos estruturadores, tanto da cinemática galileana, (relatividade do movimento), quanto da TRR. Esses problemas foram propostos ao longo das atividades que relacionam as noções básicas utilizadas nos dois campos conceituais estudados (MC e TRR), ou seja, o tempo, o espaço e a velocidade.

A resolução de problemas abertos requer a utilização de *schèmes* em um processo que é, também, uma atividade de conceitualização. Nesse sentido, foram levados em conta a função da linguagem como organizadora do pensamento, os instrumentos de mediação simbólica e os conceitos e teoremas em ação do sujeito.

Apresento, a seguir, as atividades conduzidas ao longo da pesquisa e o papel que cada uma delas cumpriu na organização das análises, bem como algumas análises sobre as participações e as produções dos estudantes. Todo esse quadro que será descrito formará a base para as análises das trajetórias dos estudantes, que será feita no capítulo seguinte.

3.4.1) 1ª aula :

Essa primeira aula foi dedicada à apresentação do conceito de referencial e sua influência no estudo dos movimentos dos corpos. A noção de sistema de referência é essencial para todo o estudo, tanto da MC, quanto para a TRR. Por isso, o interesse pedagógico do professor em iniciar os trabalhos a partir de um conceito-chave que está presente nos dois campos conceituais.

Além disso, havia também um interesse de pesquisa associado. Nossa hipótese fundamental era a de que um dos grandes obstáculos à compreensão dos conceitos da teoria da relatividade é a tendência a tornar absolutos os conceitos que são relativos. Essa tendência poderia ser verificada, estudando conceitos relativos no âmbito da mecânica clássica tais como os que foram apresentados pelo professor.

A interação inicial entre professor e estudantes foi conduzida no sentido de resgatar situações que já teriam sido enfrentadas para que os próximos conceitos

discutidos pudessem encontrar eco. Essa postura do professor se mostrou recorrente ao longo das aulas em que os assuntos já eram do conhecimento dos estudantes. Já nas aulas em que os conceitos tratados eram mais abstratos e representavam, de certa forma, novidades para os estudantes, as aulas tiveram um caráter mais forte de exposição por parte do professor.

Na sequência, o professor explorou os conceitos de partícula, movimento, repouso e trajetória. Nas situações propostas, todas elas provenientes do cotidiano dos alunos, a participação dos alunos sempre foi no sentido de dizer para o professor os conceitos o mais próximo possível da formulação científica.

Destacam-se dois pontos interessantes nessa primeira aula:

- (1) A despeito do intervalo de tempo relativamente longo entre o estudo inicial da Mecânica pelos alunos (cerca de 2 anos e meio), a lembrança das definições formais foi significativa. Quando perguntados diretamente sobre os conceitos científicos, eles utilizam sobremaneira a forma predicativa do conhecimento. A passagem a seguir ilustra esse fato.

T 1 Professor: (...) O que vocês entendem por referencial? Você <<aponta para uma aluna na sala>> o que você entende por referencial? Para você quando você ouve essa palavra "referencial", o que vem na sua cabeça naquele primeiro momento, aquele "start"?

T 2 Mariana: Alguma coisa que a gente pega para analisar ... para referenciar ... alguma coisa ...quando a gente vai analisar um movimento, a gente pega uma coisa para saber ... se determinada coisa que a gente pega se o movimento for de um jeito ... Por aí.

T 3 Professor: Antônio, quando você vê essa palavra "referencial", qual é a primeira ideia que vem na sua cabeça, aquela ideia inicial o que vem na sua cabeça?

T 4 Antônio: <<utiliza muita gesticulação>> Ah, é aquilo que você toma como base para você analisar uma outra coisa. Porque geralmente você não analisa "aquilo", você analisa "a partir daquilo". Daí, você toma como base "aquilo", entendeu? Pra você analisar o movimento ... de outra coisa, cê toma "aquilo" como base. Tipo o movimento de um carro ... cê toma como base outro carro procê analisar ele. Se ele vai em linha reta ... sua velocidade, assim. Mais ou menos assim.

T 5 Professor: uhum <<concordando>>. Vamos ver mais um aqui. Cassiano, o que você fala aí de referencial? O que vem na sua cabeça?

T 6 Cassiano: É um ponto ... inicial ... que você vai tirar conclusões sobre ... ele.

T 7 Professor: Um ponto inicial, a partir daí você tira conclusões sobre ele. Lara!

T 8 Lara: Ah! Eu acho ... eu penso da mesma forma que o Cassiano. Vai ser um ponto a partir do qual você ... vai ... a partir daquilo você vai fazer uma comparação com algum outro objeto ou lugar para tá tendo ... para ter uma comparação mesmo, a partir desse ponto você vai fazer uma comparação.

T 9 Professor: Ok, ok. E para você, Vívian?

T 10 Vívian: Ah, é basicamente o que ele falou <<aponta para o Antônio>>, é quando você quer analisar determinada situação, determinada coisa, você vai escolher alguma coisa pra servir proê tirar certa conclusão de acordo com aquilo. Por exemplo, se ... o movimento da gente, a gente tá dentro de um trem, a gente vai e escolhe como referencial uma lâmpada, pra ver se a gente tá parado ou não. Ah, acho que é basicamente isso.

- (2) Alguns alunos conseguem construir relações analógicas para expressar seus pontos de vista. Quando as discussões se tornam por demais teóricas ou abstratas, é comum percebermos que os alunos tentam trazer a discussão novamente para o plano das experiências cotidianas. Por exemplo, o professor lança um giz obliquamente para mostrar a trajetória curva. Em seguida, ele questiona se uma mosquinha estivesse no giz, qual a trajetória ela veria para as pessoas. Nesse momento, Lara procura apresentar sua explicação para a trajetória da mosca:

T 11 Professor: O caminho que ele <<o giz>> fez nesse segundo movimento foi <<desenha uma parábola no quadro>> algo mais ou menos parecido com isso assim? <<os alunos concordam>> (...) Será que uma pessoa ... um mosquitinho em pé, por exemplo, no giz aqui <<desenha um mosquito no giz que é lançado obliquamente>> ia ver o giz o fazendo isso <<desenha com as mãos, no ar, um arco>>? Vocês acham? (...) O que vocês acham que ele ia ver?

T 12 Lara: Reto

T 13 Antônio: Não, ele ia ver um negócio assim, ó. <<desenha um arco de parábola voltado para cima com o indicador direito>>.

T 14 Professor: Vamos imaginar que o mosquitinho tivesse olhando assim <<no nível do lançamento>> pra vocês. O que você acha que esse mosquitinho ia ver? <<respostas dadas por vários estudantes - inaudível>> Professor: A gente tá fazendo isso tudo aqui na mesma ... na mesma ... linha, tá? Aí o mosquitinho começa andando por aqui, ó <<no ponto do lançamento, o Professor faz um gesto com a mão aberta se deslocando na horizontal>>. O que vocês acham que o mosquitinho ia ver? <<pausa>> Isso exige imaginação, mesmo.

T 15 Mariana: Vai ver as coisas passando <<faz um gesto com as mãos, indicando o movimento no sentido contrário ao da trajetória desenhada no quadro pelo Professor>>.

T 16 Professor: Vai ver as coisas passando ...

T 17 Lara: A medida que ele for perdendo força, que o giz for perdendo força, ele vai imaginar que a gente tá flutuando e não que ele tá descendo. Sei lá. Eu acho que ... seria assim que eu veria. É igual a gente estar em uma roda gigante e imaginar ... por exemplo, você tá dentro daquela gaiolinha lá ... da ... da ... roda gigante, lá. E à medida que vai subindo, você imagina que todo mundo tá descendo. E quando ele começa a descer você imagina que todo mundo tá subindo. Eu acho que o mosquitinho ia ver quase isso.

3.4.2) 2ª aula:

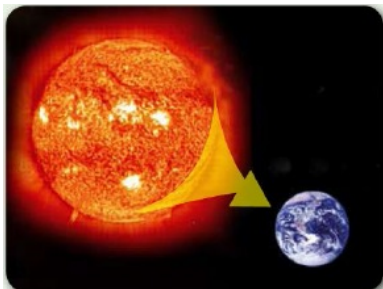
A primeira atividade escrita ocorreu na aula seguinte à explicação inicial do professor sobre a relatividade do movimento e a necessidade da escolha de um referencial para o estudo dos movimentos.

A seguir, o texto e o problema proposto.

01) Leia o texto a seguir, de autoria de Millor Fernandes, que foi publicado no Jornal do Brasil em 26/01/1990.

PRECONCEITO MUITO FORTE

Toda hora eu vejo, em jornais, revistas, televisão, e na rua, pessoas cada vez mais "livres" de preconceitos e ... E, no entanto, todas estão convencidas de que a Terra gira em torno do Sol. Por quê? Pergunte a elas e elas responderão: "Vê, Galileu 'provou' isso, há muito tempo". Mas, provou para quem? Pode ser que tenha provado pros cientistas. O homem comum, e mesmo nós, os pejorativamente chamados intelectuais, aceitamos e pronto. Sem pensar. Preconceituosamente. Como antes de Galileu acreditávamos que o Sol girava em torno da Terra. Mas, entre Galileu - de cujas 'provas' nunca tomamos conhecimento nem sabemos dizer quais são - e a realidade, que literalmente salta (gira) a nossos olhos, temos que acreditar é em nossos olhos. Nossos olhos vêem, com absoluta certeza, que o Sol nasce ali (a leste) e morre do outro lado (a oeste), girando em torno de uma Terra absolutamente parada (terremotos à parte), sobre a qual caminhamos sem sentir o menor movimento. Pra mim, o Sol gira em torno da Terra e estamos conversados.



O que podemos dizer sobre o texto mostrado acima? É o Sol ou a Terra que se move? O que significa afirmar uma ou outra coisa?

02) **ANALISE** a afirmativa a seguir e **INDIQUE** se é verdadeira ou falsa. **JUSTIFIQUE** a sua indicação.

"Se um objeto A estiver em movimento em relação a outro objeto B, e o objeto B estiver em movimento em relação a C, então, A está em movimento em relação a C".

Para a análise das respostas, procurei identificar como os estudantes aplicam o conceito de *referencial* para abordar situações que envolvem o movimento e/ou o repouso de corpos. O foco não foi o de investigar quem apresentou a resposta tida como cientificamente correta, mas de que maneira o estudante tratou os problemas que envolvem a relatividade do movimento. Sempre que possível, procurei inferir os invariantes operatórios utilizados e testar a coerência deles com a realização das atividades.

Os dois problemas apresentados aos estudantes possuíam características diferentes em função dos objetivos pretendidos. A primeira situação foi construída a partir de um texto irônico de Millor Fernandes, em que ele discorda da afirmação de Galileu sobre o movimento da Terra em torno do Sol. Para o autor do texto, somos preconceituosos ao aceitar o movimento da Terra sem saber suas evidências, assim como o eram os contemporâneos de Galileu ao defender como dogma a imobilidade da Terra. Note-se, ainda, que há uma ambiguidade no texto, pois o autor menciona o movimento da Terra em torno do Sol mas apresenta evidências que mencionam o movimento diurno do Sol na abóboda celeste, relacionado ao movimento de rotação e não translação da Terra. No entanto, o tema tratado na atividade dizia respeito ao movimento de translação da Terra em torno do Sol. A pergunta que foi colocada aos estudantes solicitava que eles se manifestassem a favor ou contra a afirmativa de Millor de que a Terra não gira em torno do Sol e sim o oposto.

Essa primeira situação insere-se na perspectiva intermediária entre a evocação mais imediata do conceito de referencial (tal como foi feito pelo professor no início da aula anterior) e a formalização desse conceito, com a extrapolação em situações novas. Dessa forma, o conceito de referencial está no centro das discussões a partir de uma situação bem conhecida dos estudantes e já estudada ao longo de suas trajetórias escolares. Mas, cada estudante deveria realizar uma atividade interna de interpretação dos argumentos do autor do texto e relacioná-los ao conceito de referencial, além de reconhecer que se trata de um texto irônico.

Essa primeira abordagem de resolução de problemas me parece importante sobretudo por permitir que os estudantes se familiarizem com novos conceitos e possam trabalhar com eles em situações relativamente conhecidas. O uso consciente do conhecimento em sua forma mais predicativa auxilia na construção de novas relações, uma vez que permite que o sujeito vá testando os limites de seus saberes em domínios que não são totalmente inéditos. Dessa forma, é possível que um alargamento progressivo das possibilidades de ação dos *schèmes* de cada sujeito.

Nessa atividade, foi possível perceber que 8 alunos fizeram menção explícita à relatividade do movimento entre o Sol e a Terra. Dentro dessa categoria de respostas, houve algumas mais complexas e outras mais diretas. Esse fato reforça a ideia de que os estudantes são capazes de reproduzir os discursos escolares com razoável precisão, sobretudo em situação que guardem semelhança com o que é

discutido e apresentado em sala de aula, o que está em sintonia com o fato de que a operacionalização de determinado *schème* pode conduzir a condutas mais “automatizadas” se a situação em jogo assim o exigir.

Por exemplo, Cassiano diz que a posição de Millor Fernandes “*pode ser aceita desde que ele tenha classificado a Terra como ponto de referência*”, para depois dizer que “*Galileu também está certo pois ele considerou o Sol como referência*”. Nessa mesma linha de raciocínio, Antônio afirmou que

“O texto quer nos dizer de uma maneira que nos faz pensar sobre referencial. E para esta pergunta dou como resposta, depende do referencial. Significa a escolha que você vai tomar para analisar o movimento, o que vai tomar para si como referencial”.

Ainda seguindo essa noção de relatividade do movimento, Thales afirma que

“O texto acima demonstra um ponto de vista sobre o movimento do Sol com relação a Terra e vice-versa, ponto de vista que não é errado, mas também não é o único que está correto uma vez que há dois referenciais diferentes (...) Isso significa dizer que o movimento é relativo ao referencial”.

Somente Nayara negou a característica relativa do movimento. Em sua resposta, a aluna diz que “*vemos o Sol nascer e a se por do outro lado, concluindo-se então que o movimento é especificamente do Sol*”, o que revela uma utilização rudimentar, em ação, do conceito de referencial. Mas, em seguida, ela afirma que

“há quem acredita que a Terra gira em torno do Sol, pois ao imaginarmos em torno, imaginamos um corpo bem maior. Como não vemos o Sol maior que a Terra, há quem acredite que a mesma faz o movimento. Mas, quem gira mesmo é a Terra.”

O *schème* de movimento de Nayara já não guarda uma característica plenamente egocêntrica, no sentido atribuído por Piaget para esse conceito (PIAGET, 2008/1926 e PARRAT-DAYAN, 1998). Isso significa dizer que a estudante parece não interpretar o mundo a partir de si pois, por exemplo, ela consegue analisar os movimentos a partir de um determinado referencial externo a ela. Mas, ocorre algo curioso que será percebido, também, nos IO de outros estudantes. Se o

referencial pode não ser o próprio sujeito, Nayara parece sempre procurar um outro objeto para ser esse sistema de referência absoluto. Entre o egocentrismo e a total descentração, parece haver uma etapa, comum a quase todos os alunos pesquisados, ligada ao estabelecimento desse referencial absoluto externo ao sujeito.

Nesse sentido, Nayara parece utilizar um conceito-em-ação de referencial como um sistema de referência absoluto para cada situação particular, o que permite inferir o seguinte teorema-em-ação: *“o corpo maior fica parado e o menor é o que se move de verdade”*. A partir desse TEA, a estudante conclui que temos a impressão de que é o Sol que gira em torno da Terra porque vemos esta estrela pequena a partir da Terra. Mas, como o Sol é, de fato, maior que a Terra, esta é que deve girar em torno daquele. Assim, a relatividade do movimento não existe para Nayara. Mesmo que seja possível termos alguma impressão do movimento solar, este fica, na concepção da aluna, imóvel.

Em geral, as pesquisas conduzidas nessa área mostram que, de fato, a Terra é o referencial privilegiado para todos os movimentos considerados nas situações propostas em suas respectivas investigações (SALTIEL e MELGRANGE, 1979; AYALA FILHO, 2010). O que está sendo acrescentado a essa discussão é a proposição de um motivo pelo qual a Terra é intuitivamente escolhida como referencial privilegiado. Tal motivo deve-se ao fato de ela – a Terra – ser o maior corpo presente na situação. Quando a situação é ampliada para uma escala astronômica, estudantes tendem a escolher o Sol como referencial.

Ainda com relação a essa atividade, Osvaldo apresentou uma abordagem cuja essência interage com as noções absoluta e relativa do movimento. Ele afirma, no início de sua resposta, que *“está provado que é a Terra que se move em torno do Sol”*. Em seguida, ele afirma que a escolha do referencial define qual corpo é visto em movimento. Para esse estudante, parece haver duas situações distintas. A primeira está ancorada no domínio da ciência. A outra dimensão, ligada aos fenômenos cotidianos, não nos permite afirmar qual dos corpos está em movimento porque a impressão do movimento está ligada à adoção de um referencial.

A segunda questão, no domínio teórico e mais distante das situações discutidas em sala de aula pelo professor, exigiu que os estudantes julgassem uma afirmativa que não fazia menção a um domínio específico do cotidiano. Para a resolução dessa situação seria necessário que os estudantes fossem além de uma

evocação ou da utilização de um conhecimento predicativo. Assim, a abordagem dessa situação exigia a aplicação do conceito de referencial em uma situação que ainda não havia sido explorada pelo professor e que, portanto, explora a utilização de parte do conhecimento ainda não consolidado. Essa característica da atividade proposta difere da anterior por focar mais intensamente na forma operatória do conhecimento.

O conceito de referencial deveria ser mobilizado para dar conta da situação apresentada. Mas, deveria haver uma articulação com as noções de movimento e de repouso. Assim, procurei avaliar se, durante as respostas dos estudantes, as palavras “movimento” e “repouso” apareciam sozinhas⁷⁵ ou se estavam acompanhadas da indicação de um sistema de referência.

Somente quatro estudantes conseguiram apresentar a relação entre as noções de “movimento” e de “repouso” com a indicação de um referencial. Desses, somente Osvaldo havia apresentado, na primeira atividade (texto do Millor Fernandes), um posicionamento que nos pareceu misto entre a relatividade do movimento e a adoção de um movimento real para a Terra.

É o que se percebe, por exemplo, na resposta de Thales. O estudante indica que

“A afirmativa acima é falsa, uma vez que A está em movimento a C quando o referencial está em C ou B, já que se o referencial estiver em A os demais objetos vão ir para trás enquanto o objeto A permanece parado, logo nesse caso C está em movimento em relação a A e não o inverso”.

Já a resposta de Osvaldo foi que

“A afirmação é falsa. Pois os objetos A e C poderiam estar parados um em relação ao outro, enquanto o objeto B estar se movendo em relação a A e C. Dessa forma, com o referencial em B, A estaria se movimentando em relação a B e, com o referencial em C, B estaria se movimentando em relação a C. Porém A e C estariam parados um em relação ao outro”.

⁷⁵ Afirmações como “o carro está em repouso”, sem que se indique em relação a qual sistema de referência.

Em duas das respostas, houve uma menção parcial à relatividade do movimento, ou seja, os conceitos de “movimento” e de “repouso” estavam ligados a referenciais. Mas, quando a palavra “velocidade” era mencionada, ela estava sempre desligada de referencial. Nessa categoria de respostas, se encontram apenas estudantes que haviam feito a distinção entre os referenciais para o movimento da Terra e do Sol.

É o que se pode perceber na resposta de Maria, que afirmou que *“Depende. Porque se o objeto A estiver na mesma velocidade do objeto C, então A está em repouso em relação a C, agora, um exemplo, se o objeto C estiver com uma velocidade maior que a velocidade do objeto A, então A está em movimento em relação a C”*.

Nessas duas primeiras categorias, temos uma supercategoria, com 6 estudantes que conseguiram apresentar, total ou parcialmente, a noção de movimento relativo em suas respostas. Todos eles já haviam, também, apresentado essa forma de abordagem na primeira situação.

A terceira e última categoria abarca três dos estudantes e é marcada pela menção a “movimento” e “repouso” sem a relação com a adoção de referenciais. Isso significa dizer que tais noções são escritas de forma absoluta. Dentro dessa categoria encontra-se Nayara, que reitera sua posição anterior ao negar a relatividade do movimento. O TEA utilizado por Nayara ainda parece ser o mesmo, o que a faz escolher como referencial absoluto o carro (que é maior que o motorista).

Além disso, nessa última categoria há também estudantes que, na situação anterior, haviam estabelecido a relatividade do movimento entre o Sol e a Terra. Esse fato pode ser explicado pela diferença entre os tipos de atividades e revela que a noção de movimento relativo ainda não está consolidada, mesmo que alguns estudantes já sejam capazes de enunciar o princípio da relatividade do movimento.

Para todos os estudantes, a análise dessa primeira atividade foi feita em ligação estreita com os turnos de participação nas discussões com o professor durante a primeira aula.

3.4.3) 3ª aula:

Na aula seguinte, foram apresentados três vídeos:

(1) o primeiro é uma propaganda antiga do jornal Folha de S. Paulo que apresenta um texto sobre algumas características de Hitler⁷⁶. Esse comercial, premiado internacionalmente, mostra uma imagem de Hitler em *zoom* e, à medida que o texto vai sendo falado, a imagem vai se afastando, até que é possível ver o rosto de Hitler. O objetivo foi o de discutir a influência do ponto de observação na compreensão de um todo.

(2) O segundo vídeo é chamado de “*Awareness test*” (teste de atenção)⁷⁷ e foi produzido pelo governo britânico como uma campanha realizada para que os motoristas prestem atenção aos ciclistas. Nele, dois times de basquete trocam passes, cada time com a sua bola. O desafio é contar quantos passes o time vestido com uniforme branco irá efetuar. Durante o vídeo, uma pessoa fantasiada de urso passa em frente à câmera e não é notada por quem assiste. Durante a apresentação desse vídeo, foi possível discutir a ideia de que é fácil perder algo que não se está procurando por ela. Esse foi o mote para que fosse possível adiantar algumas das discussões que seriam feitas mais tarde sobre a relatividade do tempo e do espaço.

(3) O terceiro vídeo é formado por trechos da aula “*sistemas de referência*” do PSSC⁷⁸ (*Physical Science Study Committee*, projeto de ensino de Física desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos da América a partir da década de 50). Como não havia áudio disponível, o Professor explicou cada etapa do vídeo. Nesse vídeo, uma bola de aço é abandonada por um carrinho que se move em relação ao chão. Duas câmeras filmam esse fenômeno. A primeira câmera está fixa no solo e a segunda se desloca juntamente com o carrinho. São percebidas, então, duas trajetórias distintas. A discussão posterior colaborou na construção da distinção entre grandezas relativas e absolutas. Quando o Professor pergunta à turma um exemplo de grandeza absoluta, Antônio afirma: *o tempo* e Cassiano indica: *o espaço*. Justamente duas das grandezas que foram consideradas como relativas na TRR.

⁷⁶ Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=jYrKEdSfO8s> (acesso em 21.ago.2011)

⁷⁷ Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=Ahg6qcgoay4> (acesso em 21.ago.2011)

⁷⁸ Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=fzV6J1iMwGlo> (acesso em 21.ago.2011)

Após a apresentação da sequência de vídeos, os alunos responderam a segunda atividade escrita, que foi marcada pela inserção do conceito de trajetória e sua relação com a adoção de um referencial. Para isso, era apresentada uma situação em que uma bola, rolando em cima de uma mesa, executa um movimento de queda em relação ao chão. Três câmaras filmam esse movimento : (A) acima da mesa ; (B) ao lado da mesa e (C) em frente à mesa. Foi solicitado que os estudantes indicassem quais seriam as trajetórias da bola captadas por cada câmara. A pergunta de número dois apresentava um *cartoon* do Garfield que fazia menção à relatividade do movimento.

Não foi possível construir dados relevantes sobre as concepções dos estudantes a partir da atividade das câmaras uma vez que todos os estudantes explicaram da mesma maneira e identificaram corretamente as trajetórias. Há várias possíveis explicações para esse fato. Uma delas, a que me parece mais satisfatória, diz respeito à maneira como o problema foi construído. As fotografias com as trajetórias mostravam a mesa e, por isso, não era necessário utilizar o conceito de trajetória como algo relativo, apenas observar a fotografia. Outra possibilidade de explicação refere-se ao fato de que os alunos haviam visto o filme do PSSC que mostrava, explicava e discutia uma situação muito parecida com a do problema apresentado. Dessa forma, os alunos apenas repetiram o que haviam visto no vídeo.

A atividade do Garfield, segunda questão apresentada nessa situação, trouxe bons elementos para a continuidade da análise das concepções sobre a influência do referencial sobre o movimento. Nessa atividade, foi possível identificar as mesmas três categorias apresentadas na atividade 1.

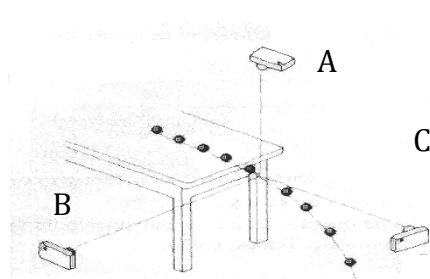
Esse fato é interessante por duas razões principais. Em primeiro lugar, reforça a existência de certas formas de agir em situação por parte dos estudantes. Essa tendência pode ser um sinal da existência de *schèmes* mobilizados para operar dentro da classe de situações envolvendo deslocamentos.

Parece-me possível, e muito útil do ponto de vista das análises aqui em jogo, conceber o movimento como um *schème* que articula os conceitos de referencial, espaço percorrido, durações e velocidade. Nesse sentido, tal *schème* se orienta no sentido de procurar um sistema de referência a partir do qual serão analisados os possíveis deslocamentos, tendo como fundamento de base o caráter absoluto dos espaços percorridos e das durações. O *schème* de movimento mais “primitivo” é aquele que organiza as ações a partir do próprio ponto de vista, sendo, portanto,

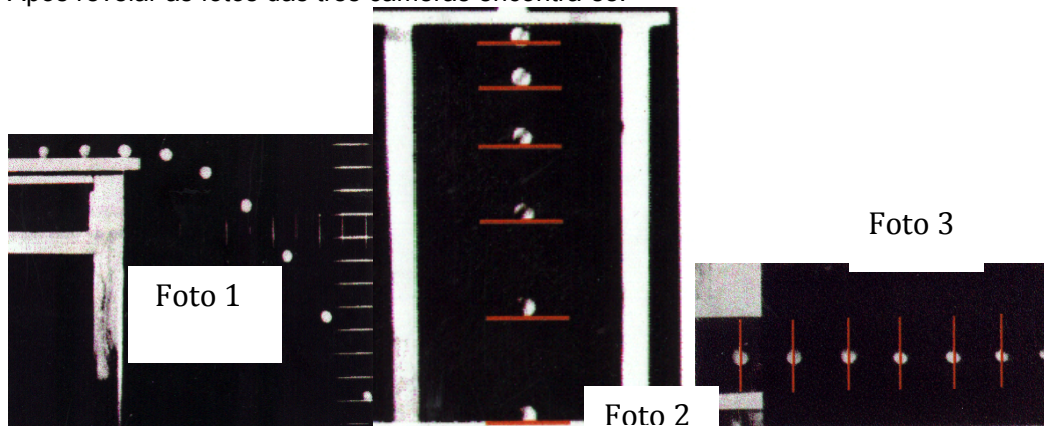
muito ligado a uma visão egocêntrica do mundo. O mais “evoluído” é o que coordena os diversos pontos de vista como possíveis para o estabelecimento dos deslocamentos e a análise das velocidades. Entre os dois, há um estágio – percebido, por exemplo, em Nayara – que não é mais totalmente egocêntrico, mas que organiza as ações a partir da busca do maior corpo presente na situação e atribui a ele o estatuto epistemológico de referencial privilegiado.

A segunda grande razão, relacionada com a primeira, diz respeito à tendência de estabilização dos novos saberes. No primeiro momento, quando da realização da primeira atividade, os estudantes poderiam ter apenas repetido informações que acaram de ouvir do professor. Há marcas dessa forma de ação mesmo na atividade do Garfield, quando estudantes escrevem que o movimento depende do referencial, para depois negarem essa ideia. Mas, essa forma de resposta tende a diminuir com o tempo. A seguir, são apresentadas as duas questões propostas aos estudantes.

01) A figura abaixo representa o movimento de uma bola que rola por uma mesa até abandoná-la, sendo fotografada por três câmeras (A,B e C) posicionadas conforme ilustrado:



Após revelar as fotos das três câmeras encontra-se:



A) **INDIQUE** qual das câmeras captou cada uma das imagens e o tipo de trajetória descrita pela bola em cada situação.

Foto 1- câmera: _____, trajetória: _____

Foto 2- câmera: _____, trajetória: _____

Foto 3- câmera: _____, trajetória: _____

B) **FAÇA** um comentário explicando o porquê de se observar fotos diferentes.

02) Veja a tirinha a seguir



Do ponto de vista da Física, Garfield está correto? Justifique a sua resposta.

Após a realização dessas atividades, e levando-se em conta as participações dos estudantes nas discussões durante as aulas, foi possível construir o seguinte quadro-resumo sobre as concepções dos estudantes quanto à utilização do conceito de referencial.

Os três momentos foram : (1) atividade sobre o texto de Millor Fernandes ; (2) análise da afirmativa do personagem Garfield sobre a relatividade do movimento e (3) análise da afirmativa sobre o movimento relativo entre três corpos.

	Atividade 1 A (Texto do Millor Fernandes)	Atividade 2 B (Cartoon do Garfield)	Atividade 1 B (Análise da afirmativa sobre o movimento de três corpos)
Movimento relativo	Cassiano; Thales; Vívian; Maria; Mariana; Lara; Antônio	Cassiano; Thales; Vívian; Osvaldo	Cassiano; Thales; Vívian; Osvaldo
Movimento misto	Osvaldo	Lara Antônio Maria Mariana	Lara Antônio Maria Mariana
Movimento absoluto	Nayara	Nayara	Nayara

Quadro 2: Comparação entre as formas de utilização do conceito de referencial pelos estudantes.

Esse quadro apresenta um resumo das formas de utilização, em ação, do conceito de referencial e pode ser entendido como uma primeira síntese da utilização de invariantes operatórios relacionados ao schème de movimento. Conforme é possível perceber, a ordem apresentada (texto do Millor, cartoon do Garfield, análise da frase) não é a ordem cronológica com que os problemas foram propostos aos estudantes, mas a ordem crescente da abstração necessária à sua resolução, conforme a interpretação das respostas dos estudantes pode indicar.

Não foram feitas tentativas de inversão na ordem de apresentação dos problemas para investigar possíveis influências sobre o tipo de resposta apresentada. Em primeiro lugar porque essa característica das respostas só foi percebida quando da interpretação dos dados. Em segundo lugar porque essa investigação acarretaria a introdução de outras variáveis na análise pela necessária utilização de outros sujeito de pesquisa.

3.4.4) 4ª aula :

Essa aula teve duração de 100 minutos e foi marcada pelo trabalho com as leis de Newton, sobretudo a lei da Inércia. Para isso, o Professor retomou as discussões já efetuadas na introdução ao estudo da MC.

O professor queria apresentar a noção de grandezas escalares e vetoriais. Para isso, após uma breve introdução esses conceitos, o professor propõe a situação a seguir.

T1: Professor: Vamos fazer uma brincadeira aqui, então. Suponha que você tenha aqui uma rua <<desenha um cruzamento no quadro>>. Isso aqui é uma rua. E essa rua faz esquina com outra rua. Na esquina aqui dessas duas ruas tem um cinema <<desenha um cinema em uma das esquinas>>. Aí tá aqui a Lara na porta do cinema, esperando seu namorado pra ver um filme. Aí, namorado que se preze sempre chega atrasado, né. Nisso vem o Cassiano. O Cassiano tá aqui de olho na bolsa dela <<risos>>. Ele tá mais de olho no conteúdo da bolsa dela ... Tá vamos trocar então. O Osvaldo vai e roubar a bolsa da Lara. Eu vou te dar duas informações, tá. O Osvaldo saiu com uma velocidade, velocidade do Osvaldo, V_o , de 2 m/s. E a Lara saiu com a velocidade de 3 m/s. Eu pergunto prá vocês, com certeza, a Lara consegue pegar o Osvaldo? <<aponta para Antônio>>

T2: Antônio: Acho que consegue, a velocidade dela tá maior. <<balança a cabeça negativamente>> A *aceleração* dela tá maior. Não, ... é velocidade(?).

T3: Lara: É, mas, se eu correr pro lado contrário.

T4: Professor: <<falando para a Lara>> Calma, calma!

T5: Antônio: Não, cê vai correr pro lado que ele tá, né!

T6: Lara: ele não falou isso!

Lara parece compreender o tipo de resposta que o professor estava procurando e a forneceu. Essa é uma característica de diversos estudantes que procuram agir em situação para fornecer as respostas que julgam ser aquelas que o professor quer ouvir. Nesse sentido, Lara compreendeu a “regra do jogo” didático que o professor estava construindo e se engajou nela.

O plano do professor era ouvir a resposta positiva (Lara consegue pegar Osvaldo) para, somente após, introduzir a ideia de direção e sentido. Com a antecipação de Lara, o professor se viu obrigado a interromper a discussão.

Na continuação desse episódio, o Professor ainda questiona a Nayara o que ela acha sobre a situação. Mas, como é característica dessa aluna, ela não formulou bem sua resposta, buscando uma resposta que fosse preencher as expectativas do professor.

T7: Professor: O que você acha, Nayara?

T8: Nayara: Ah ... eu acho que depende também.

T9: Professor: Depende de quê?

T10: Nayara: É ... depende de tudo ... do que vai acontecer ... a velocidade dele é maior, mas vai que acontece alguma coisa assim.

<<muitos falam ao mesmo tempo e riem>>

T11: Professor: Me dá um exemplo do que pode acontecer. (...)

T12: Nayara: Ah depende!

<<risos gerais>>

T13: Professor: Depende do quê?

<<risos gerais>>

T14: Nayara: Ah, se não depende ... então, pega!

(...)

Houve participações muito distintas nesse episódio. Lara e Cassiano, por exemplo, apresentaram a ideia de que seria necessária a informação da orientação das velocidades para dar uma resposta definitiva. Já Nayara ficou, apenas, emitindo respostas aleatórias, como se estivesse à procura de uma confirmação do professor.

O professor, então, procurou concluir as discussões com uma sistematização sobre os conceitos de grandeza vetorial e grandeza escalar. Para isso, ele fornece exemplos dos dois tipos de grandeza e conduz sua exposição para a próxima grandeza que iria apresentar: a aceleração.

Nesse ponto, a aula adquiriu um caráter de exposição muito mais forte. O professor apresentou os conceitos de aceleração tangencial e centrípeta e aplicou em uma situação de lançamento de projéteis. Em seguida, foram apresentados os conceitos de força e de inércia e, com isso, o professor estabeleceu as bases da Primeira Lei de Newton.

Para mostrar a aplicação dessa Lei, o professor propõe uma situação em que

dois referenciais diferentes precisam explicar a movimentação de uma bola que está dentro de um ônibus. Nesse contexto, ocorre o seguinte episódio.

T15: Então, vou provocar vocês um pouquinho aqui agora. Nós vamos chegar onde eu queria. <<enquanto fala, o Professor desenha no quadro>>Suponha que eu tenha aqui uma pista retilínea e você tenha aqui ... você está aqui dentro de um ônibus. Ok? Dentro de um ônibus. Então, tá aqui a Vívian. Tá a Vívian aqui, em pé, no ônibus. Ok, Vívian? Tá você aqui em pé, segurando no ônibus, e tal... e, na sua frente, Vívian, tem uma bola. Uma bola! Você tá aqui em pé <<faz gesto de segurar no ônibus>> e aqui na frente tem um bola, tá bom? O ônibus tá andando aqui, em movimento retilíneo uniforme para a direita com uma certa velocidade qualquer aí. Tá legal? E tem aqui um observador, na rua, vendo a Vívian passar. Tá ali, vendo a Vívian passar, né? Vívian, prá você, esse menino está em repouso ou em movimento?

T16: Vívian: Ele está em movimento.

T17: Professor: Ele está em movimento num tá? E prá ele, você está em movimento ou em repouso?

T18: Vívian: Em movimento.

T19: Professor: Em movimento. Prá você, a bola está em repouso ou em movimento?

T20: Vívian: Em repouso.

T21: Professor: Tá em repouso. E prá ele, a bola tá em repouso ou em movimento?

T22: Vívian: Em movimento.

T23: Professor: Ótimo! Esse rapaz está na Terra. Tá? Vamos imaginar que a Terra seja um referencial em repouso. Ok? E você está em movimento retilíneo uniforme e na situação de movimento retilíneo uniforme você está também em um referencial em movimento. OK? Repare que, tanto a Terra aqui ... prá nós, né? Pro nosso observador que está em repouso quanto para o movimento retilíneo uniforme, as situações Físicas se equivalem, concordam comigo? As leis Físicas que valem pro movimento retilíneo uniforme também valem para um referencial em repouso. Tanto um referencial em MRU quanto para um referencial em repouso as leis Físicas são as mesmas. Por quê? Porque eu consigo chegar nas mesmas observações. Se ele tá vendo ela em movimento, ela também tá vendo ele em movimento. Tá certo? Se ele tá vendo a bola em movimento, a bola também tá vendo ele em movimento. Se ela tá vendo a bola em repouso, a bola também estaria vendo ela em repouso. Então, tanto faz o movimento retilíneo uniforme ... tanto faz um referencial em movimento retilíneo uniforme quanto um referencial em repouso, para Newton, as leis são as mesmas. Agora eu vou brincar com vocês um pouquinho. Olha só! Esse ônibus, ele tava andando ali com uma certa velocidade. Num certo movimento ele dá de frente com um sinal vermelho. O sinal fecha. Então, o sinal fecha lá na frente e o que o motorista faz? Pisa no freio prá poder começar a parar o ônibus. Te pergunto: na hora que ... a bola tá solta, tá? Só você tá segurando. Na hora que ele pisa no freio, o que acontece com a bola?

T24: Vívian: Ela começa a rolar.

T25: Professor: Ela começa a rolar prá frente. Não é isso? Então, vamos aumentar o

tamanho do ônibus aqui prá gente poder enxergar a bola andando. Então, a bola vai rolar prá frente. Ótimo! Ok? Vívian, me explica, porque a bola rolou prá frente?

T26: Vívian: Porque todo corpo em movimento tende a ficar em movimento de acordo com a lei da inércia.

T27: Professor: Tá bom! Só que tem um detalhe aqui importante. Prá você a bola tava em movimento?

T28: Vívian: Não ... ela tava parada.

T29: Professor: Ela tava parada! Então, como você vai me explicar que é pela lei da inércia se ela tava parada? Pela lei da inércia, ela tinha que continuar o quê?

T30: Vívian: Parada.

T31: Professor: E ela começou a andar.

A situação apresentada pelo professor é muito diferente do que os estudantes já haviam estudado. É importante de se notar que, nesse ponto, a explicação de que Vívian veria a bola em movimento por inércia não se justificava mais, visto que, para esta estudante, a bola estava em repouso.

Essa é uma situação que extrapola o domínio de validade do que se está estudando, visto que o referencial de Vívian não é inercial em relação à Terra e, portanto, devem ser utilizadas as noções de “forças de inércia” ou “forças fictícias”. A intenção do professor, no entanto, era apenas “provocar” os estudantes para o desenvolvimento da ideia de que há limites de validade para cada sistema teórico. Essa foi a discussão final da aula e o ponto de partida para a aula seguinte.

A análise da filmagem feita com a câmera que estava voltada para os estudantes permite perceber o incômodo dos estudantes. Houve, inclusive, uma troca de olhares entre Osvaldo e Lara, como se um estivesse perguntando ao outro qual seria a resposta correta. Os estudantes, em geral, fizeram uma expressão típica de que estavam pensando, olhando para cima e franzindo as sobrancelhas.

Nesse momento, é interessante perceber que se o conceito-em-ação de Inércia não é pertinente para situação apresentada, torna-se necessário o estabelecimento de outro conceito. O contexto em que o problema foi apresentado é o da Mecânica e, por isso, Lara utilizou outro conceito-em-ação para resolver o problema: o conceito de força.

No entanto, como será possível perceber na continuação do episódio, seu *schème* de movimento utilizava o teorema-em-ação: “*só pode haver um movimento quando houver a aplicação de uma força*”. Como Lara ainda utiliza a separação

entre movimentos reais e imaginários, em um sentido semelhante ao que foi discutido na aula 2, sua explicação elege, como realidade, o movimento que o ônibus fazia em relação ao chão (o que ainda é coerente com o teorema-em-ação sobre a pseudo-relatividade do movimento já detectada). O outro movimento, que não possui o mesmo estatuto epistemológico do primeiro, é uma impressão que, portanto, não necessita de uma abordagem científica. A sequência mostrada a seguir ilustra essa análise.

T32: Lara: A menos que uma força aja sobre ela ... a cada ação, uma reação.

T33: Professor: Ninguém chutou a bola.

T34: Lara: Não, mas a partir do momento em que freiou ... a cada ação há uma reação. A partir do momento ... você tava em ... o ônibus tava em movimento. Você num percebe o movimento do ônibus porque você tá dentro do ônibus e você tá em movimento junto com ele. A partir do momento em que o ônibus pára ... é ... vai cessando o movimento, você continua ... tende a permanecer em movimento. O ônibus tá cessando, mas você continua. Prá mim é assim.

T35: Professor: Mas, veja bem. Seu referencial não é o ônibus?

T36: Lara: Sim.

T37: Professor: Você não estava em repouso em relação ao ônibus?

T38: Lara: Sim.

T39: Professor: O ônibus estava em repouso em relação a você. Então, você não ... pro referencial do ônibus, não tem essa noção do movimento. Tá claro? Cê falou de ação e reação. A ação aqui de freiar foi do ônibus para fora daqui etc e tal. Não foi na bola! A força de frenagem atua aqui na roda. Ação e reação acontecem em pares. Você aplica na roda uma ação de frenagem, ela aplica no chão uma reação igual. Ele ... o ônibus não aplicou na bola nenhuma força. Mas a gente chegou agora num ponto estranho, né? Porque, por inércia, a bola deveria continuar o quê? Parada. Se você perguntar prá esse rapaz que está aqui fora por quê a bola continuou andando, o que ele pode falar?

O professor explica, então, que há uma limitação nessa situação. As leis de Newton são válidas em referenciais inerciais. Quando o ônibus freia, há aceleração e, com isso, outras considerações (que ele não diz quais) devem ser levadas em conta.

3.4.5) 5ª aula:

Ao longo dessa aula, houve um debate entre o Professor, o pesquisador e os estudantes. Para a primeira parte do debate, o pesquisador questiona os estudantes sobre a forma como eles concebem a atividade de um cientista na formulação de

teorias científicas. O modelo apresentado pelos estudantes, em particular por Thales e Lara, está muito associado ao que se costuma chamar de “método científico”. Thales chega a enunciar as etapas quando afirma que os cientistas “*observam o fato que está em análise, né, e formulam uma espécie de suposição sobre como que acontece aquilo. Então, eles passam por uma forma experimental onde eles vão testar para chegar a um ... acerto.*” Além disso, Lara apresenta a ideia da indução, onde um conhecimento que mostra recorrentemente válido para um conjunto de observações pode ser expandido para outras situações.

Nesse contexto, o pesquisador questiona ao grupo de alunos quais foram as observações empíricas que Newton tinha para formular a lei da Gravitação Universal. Ao perceberem que é impossível que um cientista efetue uma verificação em todas as situações, Lara afirma que “*tem como você fazer experiência com <<uma>> parte e jogar pro todo*”, continuando, então, com sua ideia anterior da indução.

Após uma discussão sobre as possibilidades de testagem das teorias científicas, Thales afirma que “*é uma coisa que pode mudar, também, né? Por exemplo, se amanhã alguém chegar com uma teoria mais bem formulada ... não, não é porque a Terra atrai ... sei lá o que acontece lá que o negócio cai ...*”

Continuando a ideia apresentada por Thales, o pesquisador, então, introduz um novo ponto para a discussão. Os modelos conceituais de Newton e Galileu são formulações que possuem uma certa referência no mundo físico observável. Nesse sentido, ele questiona se os estudantes acham possível que, quando se começar a investigar coisas que, antes, não eram conhecidas, é possível o aparecimento de novas leis, novas regras e novos modelos.

Nesse contexto, Osvaldo afirma que

“eu acho que é. Eu acho que a gente não pode generalizar ... vamos supor ... Newton fez a teoria baseado naquilo que ele conhecia, mas a partir do momento em que ele entra em um campo que ele não conhece, os argumentos dele começam a ser questionados aí. Se isso vai valer para esse novo campo de conhecimento que não existia. Aí, devem ser feitas novas investigações, novos experimentos prá ver como que vai ser questionado aí. Se isso vai valer pra esse novo campo, prá escrever a Lei, se a gente pode generalizar essa lei ou se tem algum erro aí.”

Ainda sobre essa situação, Antônio afirma que

“com isso você vai poder ter mais ... melhores explicações e com exemplos que ... que deixem a sua própria ... <<teoria>> com uma maneira mais fácil. E, com o avanço tecnológico, você vai poder explicar de uma maneira bem mais fácil do que antigamente! Se você fosse tentar com aquilo que o Newton tinha hoje, não era possível fazer tantas coisas. Mas, graças ao que ele fez, a gente foi. Ele começou com uma base, aí foi só uma evolução.”

O pesquisador faz menção às atividades já realizadas e procura fazer uma síntese do que já foi estudado. Quando ele discute o segundo problema da segunda atividade escrita (o exercício teórico sobre três corpos que podem ou não se mover um em relação aos demais), Lara é a única estudante a afirmar que se posicionou favorável à afirmativa, dizendo que

“eu comecei a pensar que A ... eu saí criando um monte de teoria. A era um carro, B eu de ... Não! A era um carro, B uma pessoa, C é ... sei lá ... um cachorro. Primeiro, eu imaginei que A estivesse ... que o carro estivesse em movimento em relação a mim. Aí, no caso, eu estaria fora do carro. Depois, eu me imaginei dentro da carro. Aí, A estaria em movimento em relação a C, porque o carro estaria em movimento. Eu, dentro do carro e o cão estaria parado.”

A despeito do fato de que, ao que parece, a aluna não entendeu o problema e o separou em duas partes, dois pontos são marcantes nessa fala. O primeiro diz respeito à já citada capacidade de Lara de imaginar situações hipotéticas para, de certa forma, “materializar” suas explicações. Essa capacidade já havia aflorado na comparação entre o movimento em uma roda gigante e a trajetória que uma mosquinha em queda veria (aula 1).

A segunda, ainda mais interessante, é a maneira como Lara utiliza em ação o conceito de referencial. A Terra é, nesse caso, um referencial absoluto em relação ao qual os outros devem ser estabelecidos. Quando a estudante está fora do carro, ele está em movimento em relação a ela *porque* ela se encontra sobre a Terra. Quando ela está dentro do carro, ela está em movimento em relação ao cachorro *porque* ele está sobre a Terra. Nessa explicação, a Terra funciona como o referencial imóvel segundo o qual todas as outras relações de movimento e repouso

são estabelecidas e é, como já apresentado e discutido, o maior corpo presente na situação.

Após esse momento, o pesquisador retoma o exemplo desenvolvido pelo Professor sobre a bola dentro do ônibus e propõe um experimento mental aos estudantes. O ônibus vai viajar durante um grande tempo em linha reta e com velocidade constante (a estrada é reta, sem imperfeições). Além disso, as janelas do ônibus são tampadas, o que impede que as pessoas em seu interior olhem para fora. A pergunta é: tente imaginar algum experimento que possa ser feito dentro do ônibus para saber se ele está em repouso ou em movimento.

Antônio tenta uma formulação, retomando a situação proposta pelo Professor, dizendo que

“A bola pode ser um exemplo, né ... Ou, se você pedir o motorista prá parar! Se você tiver um solavanco, assim. Isso vai provar que o ônibus tava em movimento. Porque você saiu ... você tava dentro do ônibus. Parado em relação a qualquer outro objeto lá dentro do ônibus. Se você continuar em movimento, isso prova que todo o ... o ... ônibus tava em movimento também.”

Sobre essa afirmação de Antônio, o pesquisador apresenta uma nova situação. O solavanco a que Antônio se referiu poderia ser causado por uma colisão entre um carro e o ônibus, mesmo que este estivesse parado em relação ao chão. Thales intervém nesse momento e afirma que, nesse caso, os passageiros deveriam ver as janelas quebrando, etc. Esse fato pode indicar uma tentativa de negar a perturbação externa, atendo-se a detalhes que não são significativos para o aspecto crucial da questão, que era a indistinguibilidade entre o repouso e o MRU ou, de forma mais simples, à não compreensão, por parte dos estudantes, da problemática apresentada pelo pesquisador.

O pesquisador volta, então, a essa questão e solicita um experimento que possa ser feito *enquanto o ônibus pudesse ser considerado como um referencial inercial*. Antônio apresenta outra situação, dizendo que

“Eu acho que sei. Quando ... igual ... você tacou o giz <<prá cima – ele faz menção à situação já apresentada pelo Professor anteriormente>> ... aí, quando você tá parado, o giz cai ... reto. E, quando tá em movimento, cai

em arco de parábola. Isso podia explicar, né? Porque, se o ônibus estiver mexendo, aí se você tacar o giz, o giz vai cair em arco de parábola. Podia ser?”

A partir dessa fala, e sem querer apresentar respostas prontas, o pesquisador pergunta aos estudantes o que eles acham a respeito. Osvaldo, se contrapondo a Antônio, afirma que *“Ah, eu acho que não daria não porque se fosse uma pessoa de fora que visse, ela veria caindo em arco de parábola.”* Essa posição é compartilhada por Cassiano, que concorda com a formulação de Osvaldo.

Antônio, no entanto, convicto de suas posições, contra argumenta que *“Mas você podia pedir a alguém que estivesse do lado [de fora], assim.”*

Lara apresenta o argumento de que esses dois observadores indicados por Antônio pertencem ao mesmo sistema. Essa ideia é completada por Osvaldo que diz

“mas esses dois não percebem porque estão com a mesma velocidade. Mesma coisa com a Terra, então. Se você jogar um giz pro alto, você vai pegar o giz normal. Mas, o que ... a Terra não está em movimento a mesma coisa? Não seria válido esse experimento não!”

Esses argumentos fazem Antônio concordar com Osvaldo. É curioso notar que, na fala de Osvaldo, não há a indicação explícita dos referenciais para afirmar que os observadores ou a Terra estão em movimento. No entanto, essa não explicitação de referenciais pode ser devida à maior « informalidade » da fala entre dois estudantes, uma vez que o contexto da discussão já apresentava referenciais delimitados.

Após um tempo de reflexão por parte dos estudantes, Cassiano afirma que não há como distinguir o repouso do Movimento Retilíneo Uniforme (MRU) a partir das situações descritas. Os estudantes parecem concordar com essa posição. A fala de Thales resume essa posição.

“Eu acho que é ... Como é que você pode afirmar que se você não tem ... é ... as informações necessárias para você tirar uma conclusão. Igual ... você tá dentro do ônibus, fechado ... é a mesma coisa que eu te trancar num quarto todo escuro, fechado ... te boto lá no dia primeiro de ... abril e te tiro no dia 22. Se eu te perguntar a data, se você não tiver como medir, cê vai perder a noção. A partir do momento que você não tem informações necessárias para tirar uma conclusão, cê não pode afirmar nada! Eu acho

isso.”

Para fechar esse debate, o Professor retoma alguns dos pontos mais importantes já apresentados e frisa que a indistinguibilidade entre o repouso e o MRU é a base conceitual da mecânica de Newton. Sobre esse ponto, Cassiano questiona se *“talvez não seja porque a gente sempre esteja em movimento?”*, uma afirmativa que retoma a ideia do movimento absoluto.

A última pergunta apresentada pelo Professor refere-se à determinação da velocidade relativa. A questão é: um ônibus se desloca em MRU com uma velocidade de 20 m/s. Uma pessoa, dentro do ônibus chuta a bola, no mesmo sentido que o de movimento do ônibus, com uma velocidade de 2,0 m/s em relação ao chão do ônibus. Qual é, nesse caso, a velocidade da bola em relação ao solo?

Thales, então, responde que o valor é 22 m/s e é interpelado pelo pesquisador sobre o porquê desse valor. Ele responde que

“em relação ao chão, a bola já estava num ... ela já estava em movimento junto com o ônibus. Então, ela já tinha 20 m/s. Aí, assim que você chutou, essa velocidade somou à da bola. Então, pro chão, a bola teve a velocidade que já tava com ela mais a que você adicionou chutando ela.”

Ainda sobre essa situação, Cassiano discorda da afirmação de Thales, afirmando que se a bola fosse chutada para trás o valor da velocidade não seria 22 m/s. Talvez sua participação seja devida ao não entendimento do contexto da pergunta. O pesquisador, então, esclareceu que essa seria outra situação, mas que de acordo com as condições do problema, a resposta seria, mesmo, 22 m/s. Mas, se a bola fosse chutada no sentido oposto ao do movimento do ônibus em relação ao chão, o valor da velocidade resultante seria 18 m/s.

Aproveitando essa conclusão, o pesquisador enuncia o princípio geral de soma de velocidades de Galileu e propõe o último problema. Se, ao invés de uma bola chutada, uma caneta laser fosse acionada, qual seria a velocidade relativa nos dois casos (a luz ser emitida a favor e contra o movimento). Osvaldo responde que *“a princípio, seria a soma dos dois, né? Mas, eu já ouvi falar que a luz é a velocidade mais rápida que tem. Então, não há como ter algo mais rápido que a luz.”*

Essa situação não é, de todo, muito comum. O próprio Professor diz que não

esperava essa resposta nesse momento. Ele diz que “*eu não esperava essa resposta aqui não. Eu pensava que eles fossem falar que é $c + V$.*” Nesse momento, Lara indica que tinha pensado exatamente nisso (na soma de velocidades). O próprio estudante não soube explicitar onde havia “ouvido falar” que a luz possui a maior velocidade.

3.4.6) 6ª aula :

Nessa aula, os estudantes foram separados em grupos de três ou de quatro pessoas, seguindo a seguinte lógica : cada trio deveria ter um estudante que se enquadrava na primeira categoria nas três atividades anteriores (a utilização da noção de relatividade do movimento). A atividade proposta fazia menção ao paradoxo do espelho e não havia sido trabalhada, antes, pelo professor.

Essa foi uma opção metodológica: as atividades que traziam elementos já discutidos pelo professor eram feitas individualmente. As outras, que necessitavam de abstrações e/ou de construções de explicações causais ainda não enfrentadas pelos estudantes, eram feitas em grupos ou em discussões coletivas com toda a classe.

Os grupos foram assim formados :

- (1) Cassiano, Gustavo, Antônio e Nayara;
- (2) Thales, Osvaldo e Mariana;
- (3) Maria, Vívian, Clara e Lara.

Além dos nove estudantes de frequência regular, outros dois – Gustavo e Vívian – também foram alocados nos grupos, apesar de não terem participado de toda a sequência didática. Nessa atividade, somente um estudante dos regularmente matriculados esteve ausente.

Essa foi a primeira atividade realizada em grupo e foi marcada pela existência de uma troca intensa de significados entre os participantes. No final da aula anterior, o professor havia deixado uma pergunta que foi o mote dessa atividade. Se a mecânica de Newton é baseada na ideia da indiferenciação entre os referenciais inerciais, o que irá acontecer com o modelo se houver uma situação prática na qual esse fundamento fosse posto em cheque?

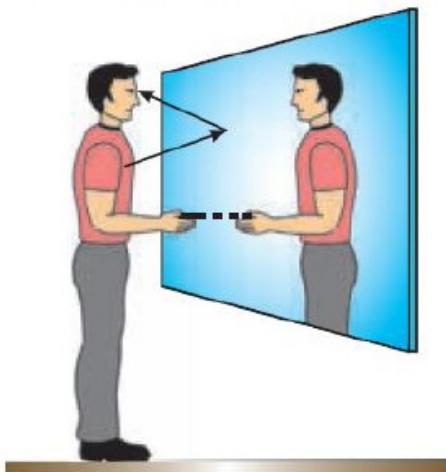
Com essa atividade, o objetivo era o de avaliar o compromisso dos estudantes com os pressupostos da mecânica e quais são os IO utilizados pelos estudantes

durante uma discussão entre os pares frente a uma situação limite de mecânica que se defronta com um dos postulados da TRR.

Nesse sentido, foi apresentada uma situação em que o mesmo experimento de pensamento fornece duas respostas distintas se realizado em repouso ou em movimento uniforme em relação à Terra. Apesar de eles terem estudado os postulados da TRR quando estavam na primeira série do ensino médio, nesse momento da sequência didática os estudantes ainda não haviam trabalhado com esse conteúdo. Por isso, a ideia de um limite superior para as velocidades não havia sido ainda formalmente apresentada.

A situação escolhida foi o chamado paradoxo do espelho e está apresentado abaixo.

Considere uma pessoa se olhando no espelho. Você já sabe que essa pessoa pode ver a própria imagem porque sai luz do seu corpo que é refletida no espelho, voltando para seus olhos, conforme mostra a figura a seguir.



Considere, agora, que fosse possível fazer o espelho viajar para a direita na velocidade da luz. Nesse caso, a luz que sai da pessoa não atinge o espelho e não há a formação da imagem. Note que é possível, nesse caso, distinguir o repouso do movimento retilíneo uniforme nessa situação, o que está contrário ao princípio da relatividade do movimento. Procure encontrar uma forma de harmonizar situação com os princípios gerais da Mecânica.

No grupo formado por Mariana, Thales e Osvaldo, após um tempo de leitura individual do texto e de alguma reflexão, Thales pergunta a Osvaldo o que ele acha sobre o assunto. A discussão avança entre os dois e Mariana parece ter dificuldade de seguir a linha de raciocínio dos colegas. Por vezes, Thales para sua fala para perguntar se Mariana está acompanhando e explicar novamente, se necessário. A ideia que surge da interação entre Thales e Osvaldo é que o espelho não pode atingir a velocidade da luz. Quando o pesquisador se aproxima do grupo, ocorre a

seguinte interação.

T1: Pesquisador: E aí! Vocês pensaram em quê?

T2: Thales: Nós chegamos a uma conclusão. É por mais que você tente aumentar a velocidade aqui do objeto, ela não vai ser igual a da luz.

T3: Pesquisador: Ah? Ah, essa é a explicação que vocês deram?

T4: Thales: É! Então, se não chega na velocidade da luz, vai chegar uma hora que ... como a luz tá no mesmo sentido do espelho ... vai chegar uma hora que a luz vai atingir o espelho... O espelho nunca vai poder chegar na velocidade da luz.

T5: Pesquisador: Tá. Vocês tiraram essa ideia de onde? É algo que vocês já sabiam ou é uma regra que vocês criaram prá isso aí ser verdadeiro? Foi baseado em alguma coisa que vocês já sabem?

T6: Thales: Por quê? Isso já existe?

T7: Pesquisador: Não sei! Vocês pensaram nisso sozinhos?

T8: Thales: Eu ... acho que foi isso! Se não for ... fui eu, então! <<risos>>

Parece-me que a perturbação que a situação criou em Thales e Osvaldo foi resolvida pela construção de uma teoria específica que coloca o problema em uma quadro mais amplo do que já era conhecido por eles. Esse tipo de conduta de compensação é muito próximo do que Piaget classificou como conduta β , na qual os sujeitos tendem a “*intégrer dans le système l’élément perturbateur surgi de l’extérieur*”⁷⁹ (PIAGET, 1975, p. 72).

No sentido de aprofundar essa discussão e investigar o nível do compromisso epistemológico que os estudantes tem com a explicação que apresentaram, o pesquisador propõe um novo problema: um raio de luz viaja horizontalmente para a direita com a velocidade c . Uma pessoa caminha sobre esse raio de luz, com uma velocidade V em relação ao raio. Qual seria a velocidade da pessoa em relação ao chão?

T9: Thales: Mas, aí, você não tá no mesmo sistema.

T10: Pesquisador: Tô! O sistema é isso aqui ó. <<desenha na folha um retângulo que engloba o raio de luz, a pessoa que caminha e o solo>>

T11: Thales: Mas, olha só, o espelho não tá em cima da luz.

T12: Pesquisador: Então vocês estão criando uma teoria específica pro espelho?

T13: Osvaldo: Não, mas a luz não pode transportar matéria.

⁷⁹ integrar no sistema o elemento perturbador surgido do exterior. (tradução nossa)

T14: Thales: Isso mesmo!

Os estudantes não perceberam a similaridade entre os dois problemas apresentados e, por isso, tentaram negar o problema, o que se aproxima da conduta do tipo α (PIAGET, 1975, p. 71). Thales diz que os sistemas são diferentes e Osvaldo nega a origem do “problema de pensamento” ao dizer que a luz não transporta matéria. Eles não propuseram respostas ao problema, talvez por saberem que a resposta clássica – a velocidade relativa ao solo seria $V + c$ – nega o modelo que eles haviam proposto – a velocidade da luz é a maior que existe. Curioso aqui notar que o mesmo princípio que eles apresentaram para o caso do espelho serviria como resposta para o problema apresentado pelo pesquisador. Mas, os estudantes não se deram conta disso, o que reforça a interpretação de que o modelo construído por eles possui, ainda, uma abrangência restrita.

O grupo, então, continuou a discutir como seria dada a forma final ao modelo proposto para ser escrito. A redação criada pelo grupo foi

“Se o espelho tiver a velocidade da luz (c), o experimento iria contrariar os princípios gerais da Mecânica. Se objetos fossem capazes de chegar a velocidade da luz, o experimento seria válido, entretanto nenhum objeto pode chegar a velocidade da luz, portanto a Mecânica ainda é válida.”

No grupo formado por Maria, Vívian, Lara e Clara, durante todo o processo de discussão, Lara tomou a palavra e conduziu as discussões e a redação da resposta. O tom de sua fala era o de explicar às colegas do grupo o seu ponto de vista. Em contrapartida, as outras participantes do grupo pouco falaram e se limitaram a concordar com o que Lara havia falado. A resposta dada pelo grupo afirma que

“A Lei da Inércia não pode explicar tal acontecimento porque o módulo da velocidade da luz é muito maior do que qualquer outro corpo com o qual poderia ser feita a experiência antes da lei ser postulada. Desta forma, para que a experiência dê certo, mesmo que o espelho se encontre a uma velocidade muito alta, é preciso que o objeto a ser refletido, também se encontre em uma velocidade que não seja desprezível.”

Essa resposta apresentada é interessante por duas razões principais. Em primeiro lugar porque admite que a validade das leis Físicas não é universal, mas

que possui um limite de validade dado pelas situações tratadas até então. Quando um novo elemento é vivenciado (uma velocidade muito grande, de acordo com o grupo), o limite de validade de tal lei pode ser alterado. Em segundo lugar porque não faz qualquer menção ao valor limite para as velocidades e, dessa forma, não responde à proposição do problema.

O terceiro grupo, formado por Cassiano, Gustavo, Antônio e Nayara, indicou que

“Se a pessoa e o espelho se movimentarem em MRU para direita a velocidade da luz, a imagem da pessoa não será refletida, como a luz não recebe influência da velocidade de seu emissor, ela sempre irá viajar a uma velocidade C . Com o espelho a velocidade C , da luz e o espelho não se encontrarão, não formando o reflexo no espelho. Assim, aplicar os princípios mecânicos na luz é relativo, pois só podem ser usados tais princípios com corpo ou matéria influenciável por contatos mecânicos. A luz como uma onda eletromagnética não sofre influências externas.”

O grupo admite que a velocidade da luz não sofre influência do movimento do emissor. Além disso, estabelece uma forte barreira entre os fenômenos mecânicos (para objetos) e eletromagnéticos (para a luz). Essa distinção, curiosamente, está na base dos problemas conceituais que deram origem à TRR. Obviamente os estudantes não tinham consciência disso, visto que tentaram, apenas, eliminar o problema apresentado a partir da negação da viabilidade de se apresentar uma resposta coerente.

Ao final da atividade, o professor e o pesquisador tentam retomar as ideias contidas na situação-problema, com a indicação de que havia, em suma, três posições possíveis de serem tomadas: a primeira é dizer que esse experimento do espelho não pode acontecer, ou seja, por algum motivo, o espelho não pode atingir a velocidade da luz porque se atingir vai dar esse problema; a segunda é construir uma nova teoria que seja diferente tanto da MC, quanto do Eletromagnetismo, e que explique, também, a situação apresentada; a terceira, que nenhum dos grupos tentou, é dizer que a Mecânica de Newton está errada.

Nesse contexto, o pesquisador questiona os estudantes se alguém havia pensado nessa terceira hipótese.

T15: Thales: Engraçado, que é o mais fácil.

T16: Clara: É o mais fácil de ser respondido.

T17: Lara: E ninguém pensou nisso.

T18: Pesquisador: O mais fácil ... é fácil de falar. Mas, é mais difícil de aceitar.

T19: Thales: Não ... é. Dá menos trabalho. Ah, esse carinha aí tá errado!

3.4.7) 7^a aula:

A aula sete foi dedicada à apresentação dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita e durou 100 minutos. Para isso, o Professor retoma as ideias centrais já trabalhadas e reforça as noções de tempo e de espaço absolutos da MC. Nesse contexto, o Professor explica o significado “tempo absoluto” e “espaço absoluto” a partir de situações envolvendo deslocamento de automóveis. Em seguida, o Professor apresenta, a partir das noções de tempo e espaço absolutos, a soma de velocidades de Galileu. A situação apresentada em seguida foi a soma de velocidades quando a luz está envolvida. Essa situação serviu de transição entre os modelos clássicos e relativísticos.

A partir desse momento, as aulas tiveram um caráter mais informativo, onde o Professor tomou para si a palavra e não mais buscou a interação com a turma. Um dos problemas apresentados foi a aparente quebra de simetria de referenciais existente no eletromagnetismo.

O Professor apresentou um fio reto condutor percorrido por uma corrente e uma carga lançada paralelamente ao fio. Nesse caso, a carga sofre a ação de uma força magnética. Mas em um referencial no qual a carga esteja em repouso, essa força magnética não existe. Assim, segundo o Professor, o princípio da validade das leis Físicas em todos os referenciais inerciais não é verificado, o que nos leva a procurar uma solução para esse paradoxo.

Tal solução poderia ser entendida em vários níveis. Em primeiro lugar, o princípio da validade das leis Físicas em todos os referenciais inerciais poderia estar incorreto. Ou, então, haveria algum problema no eletromagnetismo que não teria sido, ainda, detectado. A natureza de tal problema poderia repousar sobre as equações de Maxwell ou sobre a MC. A questão central, apresentada pelo Professor, estava associada à contraposição entre as observações cotidianas ligadas à MC e os resultados de experimentos conduzidos sobre o Eletromagnetismo de Maxwell que confirmam tal teoria.

Na sequência, o professor apresenta, ainda, os fundamentos do experimento de Michelson e Morley e a interpretação para os resultados obtidos quanto à verificação da existência do éter. Por mais que se saiba que os resultados de tal experimento não foram definitivos, no sentido de atestar a inexistência do éter de uma forma inquestionável, a montagem dos cientistas americanos foi identificada, didaticamente, como um indicativo da impossibilidade de se harmonizar, no sentido clássico, a Mecânica e o Eletromagnetismo. Esse recurso didático de apresentar certos eventos como marcantes para exemplificar ou para refutar determinada teoria⁸⁰, mesmo que receba críticas por falta de embasamento histórico-filosófico, pode ser didaticamente eficaz na criação de necessidades de novos tipos de raciocínio.

Antes de trabalhar com os postulados da TRR, o Professor discute o que significa um postulado no escopo de uma teoria científica. Após a apresentação e explicação dos postulados da TRR, o professor procurou examinar o significado e consequências de cada um deles.

Uma das situações apresentadas foi uma experiência mental. Uma pessoa na superfície do planeta Terra está sendo observada por outra pessoa fora do planeta. Para que a pessoa seja observada, é necessário que ela reflita luz e que esta luz chegue aos olhos do observador. Suponha que essa pessoa está se movendo em torno da Terra com uma velocidade muito maior que a velocidade da luz (que não há impedimento de ocorrer segundo a MC). Nesse caso, o Professor pergunta à turma o que poderia acontecer.

T1: Lara: O observador não enxergaria.

T2: Professor: Por que ele não enxergaria?

T3: Lara: Porque não ia dar tempo da luz emitida por ele chegar no observador. A velocidade dele seria muito maior.

T4: Professor: Mas, vamos imaginar, por exemplo, que, num certo instante, a luz que foi emitida por mim já tá indo na direção do observador... já tá indo ali, ao encontro dos olhos do observador. E, nesse instante, eu dou uma volta ao redor da Terra com uma velocidade muito maior do que c . O que ia acontecer? O que poderia acontecer?

T5: Thales: Você ia ver duas pessoas.

⁸⁰ Sem querer ser exaustivo, é possível citar o suposto experimento de Galileu na Torre de Pisa ou o episódio de Arquimedes na banheira.

T6: Professor: <<apontando para Thales>> Isso! O observador poderia ver duas pessoas! Olha que fato interessante: dependendo da loucura que a gente começar a pensar isso aqui, eu poderia dar uma volta tão rápida, mas tão rápida, que eu passaria por mim mesmo! <<os alunos se surpreendem com a afirmação do Professor e fazem comentários curtos de espanto entre eles>>

A partir da situação estranha – ver duas imagens da mesma pessoa – o Professor conclui que isso não pode ocorrer e aponta que o segundo postulado da relatividade pode ser utilizado para corroborar a conclusão. Esse argumento de que as situações estranhas não devem existir é bom, mas pode ter um efeito colateral. Por exemplo, para não permitir de que essa situação estranha aconteça, Einstein postulou uma outra coisa estranha à época: o caráter absoluto da velocidade da luz e, a partir daí, deduziu consequências igualmente estranhas deste: eventos simultâneos em um referencial poderiam não sê-lo quando observados por outro; relógios sincronizados poderiam medir diferentes intervalos de tempo entre dois acontecimentos, dependendo das velocidades relativas entre estes, etc.

Essa ideia foi apresentada por Cassiano, quando do estudo da dilatação temporal. Quando o professor apresentou esse fenômeno, o estudante questionou em que a dilatação do tempo era mais “normal” do que a ideia de ver duas imagens. O professor, então, argumentou que a dilatação do tempo era uma previsão teórica que foi confirmada por experimentos. Esse argumento de autoridade parece ter convencido Cassiano, que não voltou ao assunto.

O outro exemplo mencionado foi relacionado à visualização de imagens em espelhos. Uma pessoa parada em frente a um grande espelho plano pode ver a sua própria imagem porque raios de luz provenientes do corpo dela refletem-se no espelho e voltam aos seus olhos. Se essa pessoa correr em direção ao espelho com uma velocidade maior que c , ultrapassará os raios luminosos e conseguirá ver imagens suas com algum “atraso”.

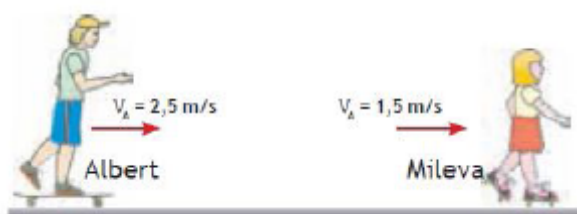
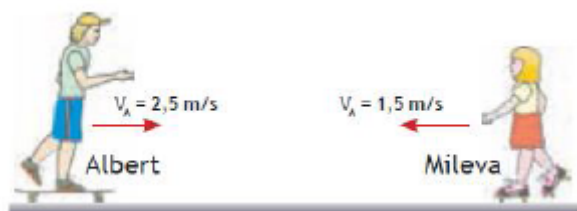
Em seguida, os alunos resolveram, individualmente, as três questões apresentadas abaixo. O objetivo dessa atividade era o de investigar como os estudantes utilizam o segundo postulado da TRR imediatamente após a explicação do professor.

A primeira questão referia-se à situação clássica de mudança de referenciais, onde é requerida a utilização da soma de velocidades de Galileu. Já na segunda

situação, em que se deveria analisar a velocidade relativa entre uma pessoa e um feixe de luz, a expressão clássica já não podia ser mais utilizada. Cabe destacar que os problemas eram conceituais e não demandavam tratamento quantitativo, com a aplicação das transformadas de Lorentz. Esperava-se apenas que os estudantes recorressem ao 2º postulado de Einstein, relativo ao caráter absoluto da velocidade da luz. A última atividade solicitava que os estudantes avaliem um procedimento para a obtenção de velocidades relativas entre um objeto e sua imagem refletida em um espelho plano. Esse procedimento, deduzido a partir da MC, leva a uma incoerência com o segundo postulado da TRR.

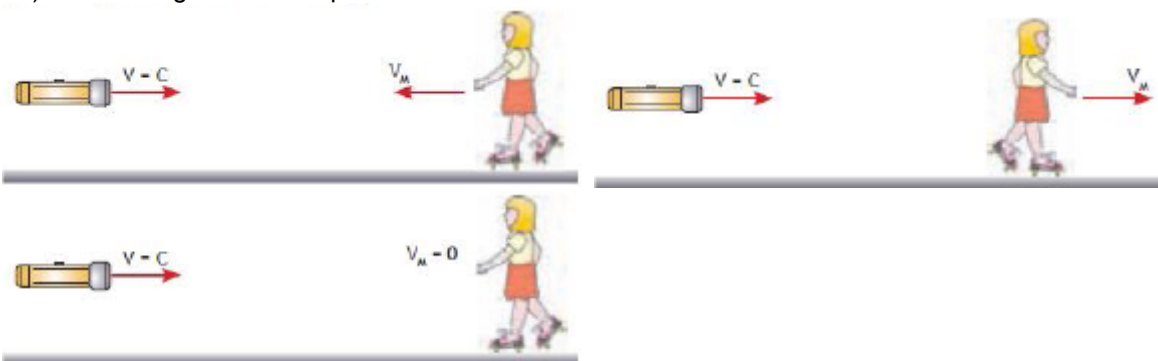
As atividades estão apresentadas a seguir.

01) As velocidades de Albert e Mileva indicadas são medidas em relação ao chão.



Com que velocidade Albert se move em relação a Mileva em cada caso?

02) Albert é agora trocado por um feixe de luz.



Determine, para cada caso, a velocidade da luz medida por Mileva.

03) Quando uma pessoa se aproxima de um espelho plano com uma velocidade V , a sua imagem se aproxima da pessoa com uma velocidade $2V$. Imagine que a velocidade da pessoa seja $V = 0,8c$. De acordo com o que foi apresentado nesta questão, a qual deveria ser a velocidade da imagem em relação à pessoa? O resultado encontrado lhe causa algum espanto? Porque?

Com relação à primeira questão, os alunos apresentaram, em sua maioria,

respostas muito parecidas e corretas do ponto de vista científico. As exceções foram Vívian e Maria.

Vívian afirmou que

“Nos dois casos ele se move com velocidade 2,5 m/s, pois está caminhando na mesma direção e sentido à Mileva. Mas podemos perceber que não há relatividade na velocidade de Albert, por ele estar sempre na mesma posição, se analisarmos a velocidade de Mileva veremos claramente que muda por ela ter mudado o sentido”.

Interessante de se notar que Vívian se fixou no desenho de Albert para afirmar que sua velocidade não mudara. Parece-me que ela não compreendeu o que deveria ser feito no problema e analisou a situação como se o segundo desenho fosse a sequência do primeiro (como dois quadros de uma animação, por exemplo). Dessa forma, a estudante afirmou que a velocidade de Albert não mudou e a de Mileva sofreu alteração. A outra possibilidade de interpretação, relacionada à atribuição de um caráter absoluto para a velocidade não condiz com o conjunto das atividades já respondidas por Vívian. Essa é a razão principal pela qual optei pela primeira interpretação.

Ao abordar a segunda atividade, a estudante diz que

“A velocidade da luz será constante independente da direção à qual é refletida, assim de acordo com o postulado de Einstein. Pois se somada passará a ter um valor maior que a da luz, e ela é considerada a maior velocidade possível (c). Ela é invariável a referenciais inerciais”.

Para qualquer uma das duas interpretações dadas acima para a resposta da estudante, seria possível encaixar essa resposta.

No caso de Maria, a situação é ainda mais simples. Ela forneceu a resposta ao contrário, ou seja, 1,0 m/s para o primeiro caso e 4,0 m/s para o segundo. O TEA revelado pela estudante é muito próximo do algoritmo para adição de velocidades de Galileu, o que pode ser verificado pela atribuição de resultados diferentes para a velocidade de Albert em relação a Mileva nos dois casos.

No entanto, os resultados fornecidos indicam que a estudante inverteu o raciocínio, o que pode ser um problema de interpretação da situação ou uma

utilização inadequada da noção vetorial da velocidade.

Na segunda questão, apenas Cassiano não apresentou a resposta baseada no postulado da relatividade. Esse estudante utilizou a soma de velocidades de Galileu, da mesma forma como havia feito na primeira questão⁸¹. Curioso como ele continua a admitir a relatividade do movimento e, portanto, da velocidade. Mas, ele permaneceu refratário aos princípios da relatividade einsteniana e continuou a utilizar o que havia aprendido sobre a relatividade galileana. Iremos retomar, no próximo capítulo, a análise das respostas deste aluno à esta atividade.

Sobre a terceira questão, a análise das respostas dos estudantes mostrou que Cassiano foi o único a se valer, apenas, de enunciados ligados à relatividade galileana. Os demais estudantes foram coerentes com o modelo da relatividade restrita. Dois comentários são pertinentes nesse momento.

- (1) Lara realizou uma operação matemática incorreta⁸², o que a fez concluir que não havia qualquer problema, já que a velocidade permanecia abaixo da velocidade da luz.
- (2) Maria apresentou um TEA coerente com o que havia estudado até então, apesar de falso no plano científico. Para a estudante, há um problema com o fato de a velocidade calculada de forma clássica ser maior que a velocidade da luz no vácuo. No entanto, ela afirma que a velocidade relativa deve ser igual a c . Ou seja, para o estudante, o significado epistemológico do postulado da constância da velocidade da luz é o de uma espécie de limite superior para o qual convergem todas as velocidades que, classicamente, seriam maiores do que a velocidade da luz. Por não conhecer a soma de velocidades de Einstein, Maria construiu uma proposição, em ação, coerente com o que conhecia sobre o postulado da TRR. Uma possível interpretação para essa situação é o fato de que, para ela, a imagem é formada pela luz refletida e, portanto, deveria ter a velocidade da luz. Além de Maria, Thales também apresentou esse mesmo TEA, como será apresentada e discutida a sua trajetórias cognitiva.

⁸¹ $C + V_M$ (primeiro caso) ; C (segundo caso) ; $C - V_M$ (terceiro caso)

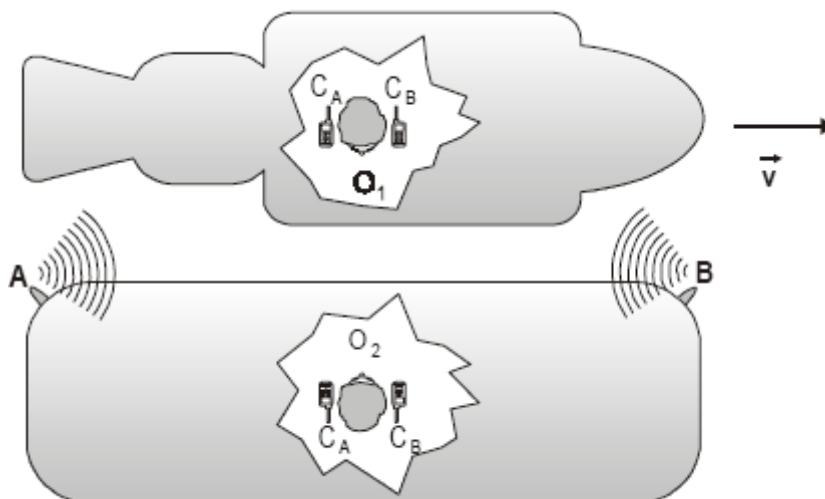
⁸² $2 \cdot v = 2 \cdot 0,8c = 0,16c$

3.4.8) 8ª aula:

Na primeira parte dessa aula, os estudantes assistem a vídeos sobre consequências dos postulados, como a relatividade da simultaneidade⁸³. O Professor, após os vídeos, retoma as discussões, apresentando a ideia de que a simultaneidade é relativa. Em todo momento, o Professor compara os resultados da TRR com os da MC.

Os alunos são, então, conduzidos à realização, em grupo, de mais uma sequência de situações-problema, agora enfocando a ideia de simultaneidade.

01) Considere a figura a seguir na qual uma nave espacial move-se com uma grande velocidade constante V em relação à plataforma. O observador O_1 está localizado no centro da nave e O_2 é um observador externo, localizado no centro da plataforma. Cada observador tem dois telefones celulares, um C_A e um C_B , junto aos seus ouvidos. A e B são fontes de radiação eletromagnética localizadas na extremidade da plataforma.



Suponha que, no instante representado, são emitidos simultaneamente um sinal do ponto A da plataforma, na frequência de recepção dos celulares C_A , e outro sinal do ponto B da plataforma, na frequência de recepção dos celulares C_B . O observador O_2 recebe os sinais simultaneamente em seus dois celulares. Você acha que o observador O_1 também recebe simultaneamente os dois sinais em seus celulares? Caso a resposta seja não, qual dos celulares o sinal em primeiro lugar?

02) Quando vemos um raio em um dia de tempestade, tempos depois ouvimos o trovão. Essa não-simultaneidade entre a chegada da luz e do som é análoga àquela discutida aqui? Discuta com seus colegas e registre suas conclusões a seguir.

O primeiro problema apresenta uma situação que pode ser respondida corretamente a partir da MC. É possível dizer, dentro desse campo conceitual, que o

⁸³ <http://www.youtube.com/watch?v=JTaMfufMI1o>. Acesso em 20.mar.2011
<http://www.youtube.com/watch?v=ZrAJN6tvHMs>. Acesso em 20.mar.2011

celular C_B irá receber o sinal primeiro *porque* a velocidade do sinal B é maior do que a do sinal A. Essa explicação é coerente com a soma de velocidades de Galileu, mas não se sustenta do ponto de vista da relatividade de Einstein. Portanto, a análise das respostas dos grupos não pode – como o é para todas as outras questões – se restringir à procura do certo do errado. Pelo contrário, há que se analisar os argumentos que levaram cada grupo a apresentar a resposta.

O grupo de Maria, Vívian, Lara e Clara respondeu, para a primeira pergunta, que *“Não. O celular C_B iria receber primeiro o sinal pelo fato de ele estar indo ao encontro de sua fonte de radiação (fonte B), enquanto C_A se afasta de sua fonte.”*

O grupo explica a não simultaneidade a partir do deslocamento que o observador O_1 faz em relação às duas fontes A e B. Esse argumento, apesar de correto, não permite a interpretação criteriosa sobre o modelo utilizados pelas estudantes.

Esse foi, de fato, um ponto falho dessa atividade. A pergunta correta a ser proposta para os estudantes seria: *“porque as emissões dos sinais A e B são simultâneas para o observador O_2 e não o são para O_1 ?”* Dessa forma, os estudantes deveriam efetuar a comparação efetiva entre os dois referenciais. Da forma como foi apresentada a pergunta, seria possível responde-la corretamente apenas com os conhecimentos da MC e, com isso, o objetivo do item não foi alcançado.

Para a segunda pergunta, a resposta foi

“Não. Porque a velocidade da luz é maior que a velocidade do som, por isso há tal diferença. O som também possui como referência o ar, logo, caso haja vento, sua velocidade pode ser afetada, sendo assim como sabemos que a velocidade da luz é absoluta, esta não seria afetada por este motivo não podemos considerar análogas as situações.”

O grupo de Cassiano, Gustavo, Antônio e Nayara apresentou as seguintes respostas. Para a primeira pergunta, a resposta foi *“Não. O celular C_B recebe sinal primeiro, pois a nave vai de encontro a onda B e recuando da onda A.”*

Para a segunda pergunta, os estudantes indicaram que

“Não. A simultaneidade não ocorre não só pelo fato de serem tipos de ondas diferentes, a situação também é. Na primeira as ondas seguem para

pontos diferentes, já na segunda situação ambas as ondas seguiram para um mesmo ponto. A diferença de velocidade causa a diferença de percepção.”

Para Mariana, Thales e Osvaldo, a primeira pergunta foi respondida da seguinte forma: “ O_1 não recebe simultaneamente os dois sinais em seus celulares. O celular C_B recebe o sinal primeiro, já que está indo ao encontro ao sinal do ponto B.” Já no caso da segunda pergunta, a resposta apresentada foi “Não é análoga, já que a luz e o som têm velocidades diferentes.”

3.4.9) 9ª aula:

Esta aula durou 100 minutos e o Professor iniciou as discussões a partir da constância da velocidade da luz para apresentar uma situação em que há uma lâmpada no chão dentro de um vagão e um sensor no teto, na mesma vertical que passa pela lâmpada. Um observador dentro do vagão vê a luz se deslocar na vertical para cima. Com o vagão em movimento em relação ao chão, um observador externo verá a luz se deslocar em uma diagonal, como mostrado na figura a seguir.

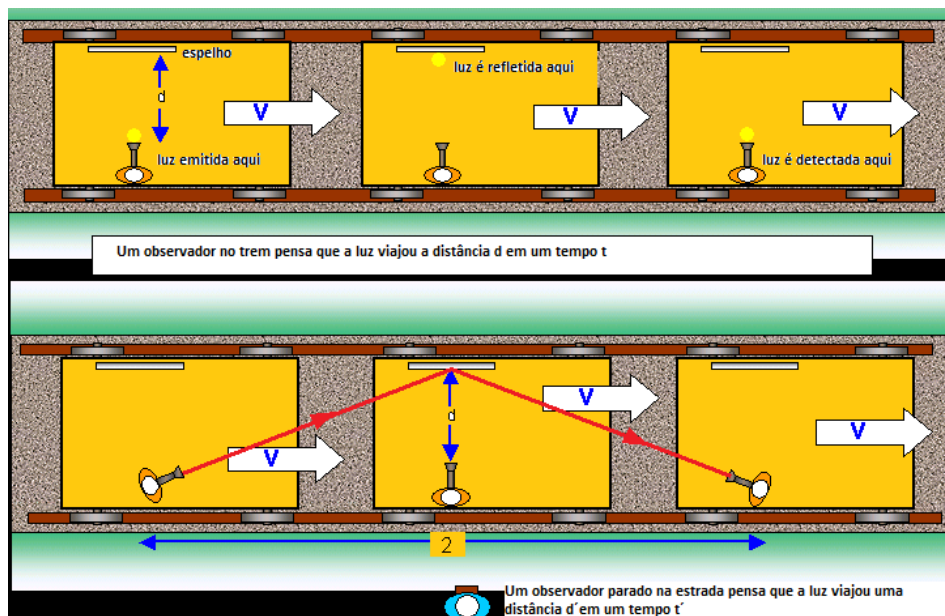


Figura 10: Representação da figura feita pelo professor para ilustrar a explicação da dilatação temporal.

A ideia é mostrar porque a distância percorrida pela luz, vista pelo observador externo, é maior que aquela vista pelo observador de dentro do vagão. Segundo o Professor, para a MC, os tempos de movimento vistos pelos dois referenciais deveriam ser os mesmos, mas a velocidade da luz vista pelo referencial externo ao

vagão seria maior. No entanto, para a TRR, a velocidade da luz deve ser absoluta e, para isso, o tempo é que deveria fluir de maneira diferente para os dois observadores.

Esse argumento foi apresentado pelo Professor que, com base no segundo postulado de Einstein, introduziu a necessidade em se estabelecer uma noção de tempo relativo. Ao longo da exposição do Professor, ele sempre fazia a comparação entre os resultados da MC que, segundo ele, seriam mais fáceis de aceitar por estarem em consonância com observações cotidianas e da TRR, mais abstrata e de difícil visualização por parte das pessoas. O Professor, ainda utilizando o exemplo do movimento do vagão, deduz a expressão da dilatação do tempo e discute esse resultado com a turma.

A apresentação da formulação matemática para a dilatação do tempo⁸⁴, após a sua dedução formal a partir dos argumentos de Einstein, foi importante para ajudar na construção da representação do tempo relativo. Esse conceito é muito abstrato em si e a dedução a partir de uma situação até certo ponto simples e a representação matemática ajudaram na discussão posterior sobre o porquê de ser tão difícil a percepção da dilatação temporal em situações cotidianas.

Por fim, utilizando como exemplo uma fonte que emite regularmente (com frequência constante) um pulso luminoso e um observador que se aproxima e se afasta dessa fonte, o Professor chega mais uma vez à noção do fluxo relativo do tempo. Então, ele apresenta o chamado “paradoxo dos gêmeos”, indicando que os tempos de ida e volta em uma viagem dependem de qual o referencial utilizado. Essa conclusão causa um espanto nos estudantes que, apesar de demonstrarem compreensão nos argumentos do Professor, estranharam o fato de que haveria dois irmãos gêmeos com idades diferentes.

Até esse momento, o professor conduziu a explicação de forma unilateral, ou seja, a explicação estava centrada nele. As perguntas feitas à turma eram apenas um reforço ao que ele já havia acabado de falar, sem pretender que os alunos, de fato, apresentassem suas ideias.

O pesquisador, então, retoma a discussão com a turma sobre o paradoxo dos

⁸⁴ A relação entre o tempo dilatado ($\Delta t'$) e o tempo próprio (Δt), conforme já apresentado, é

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

gêmeos e pergunta à turma se a diferença de tempo de vida dos gêmeos é uma percepção ou uma realidade física. O objetivo era o de investigar como esse novo conceito de tempo relativo poderia ser percebido e representado pelos estudantes.

T1: Antônio: Acho que, na verdade, o resultado não muda na verdade não. O que acontece é a percepção do fenômeno que vai ser em momentos diferentes... de pessoa prá pessoa.

T2: Pesquisador: Quando o professor demonstrou isso aqui <<a dilatação do tempo no paradoxo dos gêmeos>>, ele demonstrou percepção ou ele demonstrou ...

T3: Antônio: É ... ele demonstrou a realidade.

T4: Pesquisador: Pois é. O que foi que ele disse? Esse está 150 minutos mais velho e esse está 120 minutos mais velho.

T5: Antônio: Só que com velocidade ...

T6: Pesquisador: Se chegar um perto do outro assim ... é que duas horas, duas horas e meia não vai fazer muita diferença, né? Mas, vamos botar uma velocidade extremamente grande. Vamos pensar que, ao invés de combinar 10 pulsos, eles combinem 10 milhões de pulsos. Então você vai aumentar isso aqui <<os tempos em jogo>> em seis zeros.

T7: Lara: Morreu antes de voltar, né?

T8: Pesquisador: Então, essa é a ideia! Se eu aumentar demais isso aqui, essa diferença não vai ser só de meia hora. Essa diferença pode ser ... sei lá ... 10 anos, 30 anos. E aí, na hora que chegar um na frente do outro. Vai ter diferença? Eles vão estar biologicamente diferentes? Se você falar que vai ser uma percepção só ... ah, achei que fosse ... você está falando que, na verdade mesmo, o tempo é o mesmo e ... os dois estão igualmente velhos ou jovens. Se você acha que a dilatação do tempo é uma ... vamos colocar isso entre aspas, né ... realidade, então, um vai envelhecer mais que o outro. Quer dizer, na verdade, um não vai ficar mais novo que o outro, né? Os dois vão envelhecer. Só que um envelhece numa taxa mais lenta. E aí? Se eu aumentar esse negócio aqui de dez pulsos para muitos pulsos, de tal forma que haja uma diferença de 30 anos entre eles. Os dois irmãos gêmeos vão ser, ainda, idênticos ou vai haver uma diferença de envelhecimento de 30 anos entre eles?

T9: Lara: Nossa! Prá mim assim de cara? Eu acho que sim, eu acho que vai haver diferença sim.

T10: Pesquisador: Você acha que essa dilatação do tempo, apesar de ser meio maluca, se a gente andar muito rápido a gente vai vivenciar.

T11: Lara: Eu acho que sim.

T12: Cassiano: Eu também acho que sim.

T13: Lara: É, eu acho que sim! Senão, não teria motivo prá você estudar tanta coisa. Ah ... vai ter um tempo ... um vai envelhecer mais do que o outro ... durante um tempo. Só que a gente vai ficar estudando isso porque a gente achou isso prá provar que o tempo vai passar mais rápido prá ele, mas ele não vai envelhecer ... sei lá! Sabe? É como se eu tivesse tentando criar – se isso NÃO fosse possível – tentando criar uma teoria em cima de algo

que eu tenho certeza que não existe. É meio, né? meio “não tenho nada prá fazer, eu vou inventar”!

O argumento de Lara indica sua forma peculiar de lidar com o conhecimento científico. Para ela, a prova da realidade da relatividade do tempo repousa no fato de alguém utilizou seu tempo para fazer um estudo sobre o assunto.

Para dar prosseguimento na discussão, o pesquisador tenta ampliar a participação para os outros alunos.

T14: Pesquisador: É um argumento bacana. Mas é um argumento de necessidade, né? “Eu acho que é assim, porque se não fosse, ninguém ia perder tempo fazendo.”

T15: Lara: Acho que é a melhor resposta que eu posso te dar.

T16: Antônio: Isso ia acontecer se um trem andasse muito rápido também?

T17: Pesquisador: Por exemplo. Sobre isso que você falou, eu vou falar um negócio aqui. Mas, antes, eu queria ouvir de mais alguém.

T18: Osvaldo: Eu acho que acontece a dilatação, sim. Mas, quando a gente fala de dilatação, a gente lembra o conceito que a gente tem de espaço, igual uma barra de ferro ao dilatar, aumenta o tamanho. A gente tem essa percepção. Aí, a gente pensa: bom, o tempo aumentando de tamanho é uma coisa meio abstrata e a gente não consegue entender direito. Mas, eu acho que o fato da dilatação do tempo ... é um aumento do tempo ... é o tempo que tá aumentando em relação aos outros. Pelo que tá provado eu acho que o que acontece é isso.

T19: Thales: Eu acho que dilata sim. Eu acho que é que nem ele <<Osvaldo>> falou. Coisas que acontecem aqui demoram mais para acontecer com outra pessoa que tá viajando a uma velocidade muito alta no universo. Pega, por exemplo, um foguete e sai.

T20: Pesquisador: E aí, mais alguém? Basicamente, a gente tem duas posições, né? Ou isso aqui é uma bobagem, não existe. Matematicamente, eu entendi, mas não concordo. E a outra posição é: matematicamente eu entendi e ... deve acontecer. << Maria, Lara e Nayara afirmam que esta última é a crença delas>> Aí, uma perguntinha prá vocês. Imagina assim: 1 ano pro cara dentro da nave aqui pode corresponder a 10 anos pro cara que ficou aqui <<fixo no solo>>, dependendo do número de pulsos, da velocidade. Será que esse 1 ano que passou pro cara aqui, que a gente vai falar que é o “tempo dilatado” porque entre um “tic” e um “tac” demora mais tempo do que se ele estivesse parado. Será que esse cara vai achar um tédio? Será que esse cara que tá aqui dentro <<da nave>> vai falar: “nossa, tá custando a passar o tempo!” ?

T21: Antônio: Não, prá ele o tempo vai passar ... pros dois, a percepção deles vai ser igual, só que, no geral assim ... ó ... a percepção dele vai ser igual, só que, por fora assim vai passar rápido, entendeu? Como se ele não tivesse vendo que ele tá mais atrasado. Prá ele

vai passar normal.

T22: Pesquisador: Concordam?

T23: Thales: No referencial dele é o tempo onde ele tá acostumado.

T24: Pesquisador: Concordam? Discordam? Ele só vai saber que houve essa dilatação quando ele voltar e comparar! <<Lara concorda com essa afirmativa>> Vocês já viram um filme que se chama “O planeta dos macacos”? Esse filme é isso! Um astronauta sai viajando. Passa 10 anos na espaçonave. Quando ele volta prá Terra já se passaram centenas de milhares de anos. Só que ele só vê ... tanto que ele chega .. ele nem reconhece que tá na Terra. Ele acha que tá em outro planeta. Ele só descobre que tá na Terra, no finalzinho do filme, quando ele vê o bracinho da estátua da liberdade. Mas ele não sabia, porque quando ele voltou, ele encontrou uma Terra que estava a centenas de milhares de anos no futuro e ele estava 10 anos mais velho só. Se a gente começar a viajar em velocidades muito altas, isso vai ser possível. Agora, legal isso que vocês estão dizendo. A percepção própria de tempo que a gente tem é a nossa percepção de tempo mesmo. A gente só vai saber que o tempo passou mais lento, mais devagar, mais rápido, se a gente comparar com outro. Esse nome, “relatividade” é isso, né. Você tem dois referenciais medindo um evento. E eles comparam os resultados. A relatividade está exatamente na comparação. Desses dois resultados. A essência do tempo ser relativo é isso. Aí, vou fazer uma perguntinha antes de a gente ir para as atividades. O professor comentou naquele experimento de Michelson-Morley, que tentou verificar a existência do éter, e acabou mostrando que havia a velocidade da luz absoluta. Só que o Michelson, quando ele fez pela primeira vez a experiência e não conseguiu dar o resultado que ele esperava, porque ele esperava achar, de fato, a existência do éter, ele acreditava nisso. Aí, ele não achou. Ele refez a experiência várias vezes, mudando o experimento prá tentar achar aquilo. A que vocês atribuem essa atitude dele?

T25: Cassiano: Não aceitar mudar a hipótese que tinha.

T26: Pesquisador: Então aquela coisa que o Thales falou que era a forma que o cientista ... como é ... ele tem um modelo, depois ele faz um experimento e testa o modelo prá ver se deu certo, não é tão simples assim, né? Porque o cara quando ele vai prá prática, ele já tem uma teoria na cabeça, ele já acha que vai encontrar alguma coisa. E quando ele não acha, aí vai acontecer isso aí: “não achei, não é porque a coisa não existe; não achei é porque não fiz o experimento correto.”

T27: Professor: Muitas vezes, a pessoa faz a experiência prá encontrar aquele resultado que ela está querendo encontrar, né. E a experiência pode vir com uma série de erros porque naquela vontade de encontrar o que ele quer encontrar, ele acaba cometendo alguns erros. Então, tem que tomar cuidado quando a gente está fazendo um processo experimental.

Há, nesse episódio, diversos pontos interessantes a considerar. A princípio, a posição apresentada por Lara que auxilia na interpretação de sua relação com o

saber escolar. A estudante tende a valorizar sobremaneira o saber escolar, procurando fornecer respostas que ela julga serem as que o professor espera, mesmo se, às vezes, estas não estejam de acordo com suas próprias concepções. Nesse contexto, Lara afirma que a dilatação do tempo deve ser verdadeira pois, do contrário, nenhum cientista iria estudá-la.

A outra situação interessante é a posição de Antônio sobre a percepção da passagem do tempo quando a dilatação do tempo é estudada. Tal posição está calcada na ideia da relatividade do tempo, onde cada observador mede seu intervalo de tempo relativo ao sistema de referência em que se encontra sem perceber a existência de uma dilatação. Esse é um bom indício de que Antônio projetou para esse fenômeno relativístico a noção de relatividade do movimento.

Outro ponto interessante é a explicação dada por Osvaldo sobre o porquê da dilatação do tempo ser tão difícil de entender. Para isso, o estudante faz uma comparação com a dilatação térmica, onde o aumento de temperatura provoca um aumento nas dimensões de um corpo. Mas, ainda segundo o estudante, como dizer que o tempo aumenta suas dimensões se ele não possui comprimento, largura e altura?

Uma novidade só pode ser assimilada a um *schème* do sujeito se houver nela algo de já sabido. E, a todo momento, o sujeito em ação faz isso, procurando reconhecer, no novo elemento, quais as propriedades/características compatíveis com seus *schèmes*. No caso de Osvaldo, ele consegue relatar uma experiência pessoal. Ao se defrontar com o fenômeno da dilatação temporal, o estudante construiu uma analogia com a outra dilatação que ele conhecia e procurou transferir para o tempo as propriedades da dilatação térmica. Entraram em jogo, portanto, os CEA de duração, de temperatura, de comprimento e de dilatação. Nesse contexto, o TEA que engendra essa analogia diz que “o tempo se dilata de maneira similar ao que ocorre com um corpo aquecido”.

Nesse momento surge um problema, pois o fenômeno da dilatação térmica não é totalmente compatível com o fenômeno agora estudado (Qual “dimensão” do tempo vai crescer? O que equivale, para o tempo, ao aquecimento?). Logo, as diferenças entre o objeto assimilado e o *schème* de tempo do sujeito que o assimilou dá origem a um desequilíbrio na estrutura do estudante que precisa ser compensado.

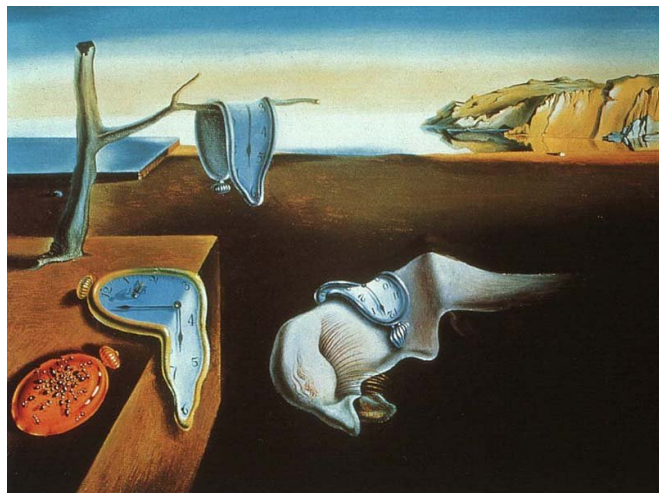
A acomodação que foi conseguida por Osvaldo ocorre no sentido de

coordenar os *schèmes* de tempo e de movimento, associando à dilatação temporal não uma consequência do aquecimento, mas causada pelo deslocamento que um objeto faz em relação a outro, o que lhe permite agir sobre uma grande quantidade de novas situações. Osvaldo consegue resolver essa situação dizendo que é o próprio tempo que dilata, ou seja, ele admite que o tempo (na verdade, as durações dos eventos) possui uma existência própria e que pode ser medido de maneira diferente em função do estado de movimento ou de repouso dos medidores. Esse TEA revela que o tempo relativo está associado aos conceitos mecânicos e, não, térmicos. Um novo equilíbrio se processou em um patamar mais elevado do ponto de vista cognitivo.

3.4.10) 10ª aula:

Essa aula foi toda ela dedica à resolução individual dos problemas apresentados a seguir.

- 01) Os robôs que já foram enviados para explorar Marte precisam ser autômatos, ou seja, não podem ser controlados da Terra em tempo real. De que maneira os aspectos já estudados da relatividade explicam esse fato?
- 02) Imagine um planeta a uma distância de 10.000 anos-luz da Terra. Seria possível que um viajante espacial terrestre chegue a esse planeta com vida?
- 03) Esse quadro, denominado *A persistência da memória*, é de autoria de Salvador Dalí e foi pintado em 1931. Observe bem as suas características principais e faça um paralelo entre a obra e a Relatividade Restrita.



Como é possível perceber, essa atividade apresentava três situações muito distintas entre si para investigar de que maneira os conceitos da TRR poderiam ser reconhecidos e utilizados na resolução de problemas teóricos. Todas as três questões estão relacionadas com o segundo postulado de Einstein. No entanto, cada uma delas foi construída para avaliar diferentes aspectos.

A questão 01 se baseia no fato de que a velocidade da luz não é infinita. Dessa forma, sempre haverá um atraso entre a emissão de um sinal luminoso na Terra e a sua chegada ao robô que está em Marte. Não se coloca, nesse caso, a questão da dilatação do tempo, visto que não se está fazendo qualquer comparação entre os referenciais na Terra e em Marte. Mas, esse reconhecimento não é trivial.

Oswaldo, por exemplo, utilizou o segundo postulado como argumento, ao dizer que isso se deve a um

“descompasso de tempo entre a Terra e Marte, sendo preciso portanto que o próprio robô possa tomar a decisão do que fazer, caso contrário a diferença de tempo poderia implicar na perda do mesmo, devido uma dificuldade que ele encontrasse e **não chegaria resposta para tomar uma decisão**”.

A princípio, essa resposta poderia ser classificada como uma tendência a atribuir à dilatação temporal a necessidade de robôs autônomos em Marte. Mas, a parte final, por nós negritada, sugere a causa do “descompasso de tempo” é, para Oswaldo, a distância entre os planetas.

Nessa mesma linha de raciocínio, Thales começou a trabalhar sua explicação a partir do conceito de dilatação temporal, mas, em seguida, se referiu ao atraso do envio do sinal. Para o estudante, os robôs precisam ser autômatos porque “*o tempo na Terra é diferente em Marte (...). Sendo assim, as coordenadas ditadas por cientistas na Terra levariam um tempo para chegar em Marte (...)*”.

Os demais estudantes que propuseram uma explicação fizeram menção à dilatação do tempo. Nesse grupo encontram-se, por exemplo, as seguintes respostas:

“Por causa da forma com que é percebida e vivida o tempo em diferentes ambientes, cada qual irá tomar como referência o tempo no seu ambiente e só é percebido a diferença quando comparados. Então é necessário que quando controlamos ou analisamos corpos que estão em diferentes estados façamos reajustes no tempo, pois perceberemos uma diferença.” (Vívian)

“O tempo na Terra não passa do mesmo jeito que em Marte. O tempo é relativo, precisamos determinar um referencial para conseguirmos analisá-lo. A velocidade é quem influencia (sic) no tempo provocando variações de segundos, horas e até mesmo anos de um lugar para outro. Então os robôs devem ser autônomos porque o tempo real aqui na Terra não é o mesmo de lá.” (Mariana)

“Pelo fato do tempo na Terra ser diferente do tempo de um corpo em velocidades próximas à velocidade da luz, velocidade esta que os robôs possuem quando estão em órbita” (Lara)

“A Relatividade Especial prevê que, um relógio a bordo em Marte não marcará o mesmo intervalo de tempo que outro relógio em repouso na superfície da Terra → condições de funcionamento e sincronizados anteriormente. Essa dilatação temporal não é notada por nós e nem por relógios. Na teoria da relatividade cada observador tem sua própria medida de tempo.” (Nayara)

As respostas indicam que os estudantes conseguiram utilizar um *schème* de tempo que se vale de IO ligados à relatividade temporal, mas que o CEA de intervalo de tempo relativo foi determinante na resolução da situação. Pelo fato de tal CEA não ser pertinente para a situação, o que conduziu os estudantes a apresentarem respostas insatisfatórias ao problema. Por isso, a amplitude de ação do *schème* de tempo de cada sujeito deve, ainda, ser testada pela análise das outras respostas. É o que será apresentado a seguir.

A segunda pergunta mostrava uma situação totalmente idealizada, pois questionava se uma criança recém-nascida poderia chegar viva em um planeta a 10 000 anos-luz da Terra. Essa situação, para ser respondida corretamente, necessitava da dilatação temporal e de um reconhecimento da relatividade do movimento. Então, o estudante deveria perceber, em primeiro lugar, que a distância de 10 000 anos-luz é medida em relação a um sistema de referência que está fixo na Terra e que, por isso, uma viagem até esse planeta levaria um tempo muito grande, medido a partir da Terra. Mas, dependendo da velocidade de uma nave, o tempo próprio, medido por quem está na nave, poderia ser equivalente ao tempo de vida de um ser humano.

A análise que se pode fazer a partir das respostas dos estudantes é que, para a maioria deles, o tempo relativo ainda não está consolidado por causa de uma utilização inadequada do conceito de referencial. Dizendo de outra maneira, o *schème* de tempo trabalha de forma solidária ao de movimento, cuja organização das atividades é orientada na procura de um referencial privilegiado.

Nesse sentido, Antônio diz que

“mesmo com a velocidade da luz, <<o recém nascido>> gastaria um período de tempo que para os seres humanos seria impossível permanecer com vida. E como não existem velocidades maiores que a da luz, é sim impossível”.

O estudante não faz considerações sobre qual o referencial utilizado para a

medição da distância mencionada e, portanto, atribui a essa distância um caráter absoluto. O tempo que a luz leva para percorrer a distância entre os dois planetas, para Antônio, é de 10 000 anos, não importa qual referencial utilizado nessa medição. Essa contradição entre essa resposta e aquela dada à primeira pergunta⁸⁵ revela que o *schème* de tempo foi utilizado juntamente com o de movimento e que este contém o CEA de referencial como algo absoluto. Por isso o estudante mostra, ainda, a tendência a interpretar as grandezas físicas tempo e espaço como entidades absolutas.

Isso também ocorre com Osvaldo, que apresenta a ideia de que a situação abordada na questão não seria possível “*pois supondo que ela viajasse à velocidade da luz, que é a máxima velocidade, ela ainda demoraria 10 000 anos para chegar a esse planeta, o que impediria que esta chegasse com vida (...)*”.

Essa também é a explicação apresentada por Lara, que diz, de forma mais contundente do que Osvaldo, que “*a distância já é medida considerando que a viagem seja feita na velocidade da luz*”. Para ela, a distância de 10 000 anos-luz já foi medida em relação à Terra e, por isso, o mínimo de tempo que seria gasto na viagem é 10 000 anos.

Dois estudantes apresentaram respostas semelhantes no que diz respeito à consideração de dois referenciais distintos: Mariana e Thales.

Mariana, revelando ter considerado o tempo na Terra, disse que

“Porque esses 10 000 anos estão sendo considerados como tempo na Terra. No espaço e com a velocidade da luz, o tempo passa diferente, já que ele é relativo. Na Terra, os 10 000 anos passam normalmente, mas no espaço esse tempo passa devagar, resultando em um número menor de anos”.

Já para Thales,

“Se fosse possível tal viagem, o foguete teria de ter uma velocidade muito alta, sendo assim, a dilatação temporal seria muito grande também, podendo então chegar com vida ao outro planeta”.

A diferença que pode ser trazida à tona entre as duas respostas é que a primeira ainda não revela uma total desconexão da ideia de movimento absoluto.

⁸⁵ “A percepção e variação do tempo pode mudar de ambiente para ambiente (...)”

Isso pode ser concluído por meio de duas afirmações: “*no espaço o tempo passa diferente*” e “*na Terra, os 10 000 anos passam normalmente*”. A interpretação da resposta indica que Mariana ainda utiliza um CEA de referencial que identifica a Terra como um sistema privilegiado.

Já na resposta de Thales, há uma lacuna quanto à sua compreensão do significado físico dos 10 000 anos-luz, visto que o estudante não aborda esse tema em sua resposta. Mas, a ideia de que a criança recém-nascida poderia chegar ao outro planeta ainda com vida é uma indicação de que ele reconhece os dois diferentes tempos (ou as duas diferentes distâncias) como válidas em seus respectivos referenciais.

A terceira questão procurava apresentar uma obra de arte que fora realizada por Salvador Dalí em 1931 – A persistência da memória. Esse quadro apresenta três relógios moles, cada um deles marcando uma hora diferente. Segundo a interpretação dada pela Fundação Gala-Salvador Dalí (<http://www.salvador-dali.org/media/upload/arxiu/Amics/PersisFranWeb.pdf>, acesso em 17.jan.2013), os relógios moles marcam a relatividade do tempo tal como concebida artisticamente por Dalí.

A utilização dessa questão tinha como objetivo apresentar um cenário bastante aberto para que os estudantes pudessem falar sobre o tempo. Nesse sentido, queríamos investigar que eles seriam capazes de utilizar o CEA de intervalo de tempo relativo em uma situação não científica. A maneira como a questão foi elaborada, solicitando explicitamente uma relação com a Relatividade Restrita, apesar de dirigir as respostas dos estudantes, era essencial para evitar que o problema ficasse por demais aberto.

De uma maneira geral, os estudantes propuseram respostas em que o tempo relativo era, de alguma forma, citado. A exceção foi a resposta de Cassiano que afirmou ter compreendido que o quadro indica ser o tempo sempre o mesmo, mas não explicou essa afirmativa. Essa é uma característica interessante da trajetória cognitiva de Cassiano, já indicada em outros momentos.

Na primeira parte das atividades, ele revelou utilizar bem o *schème* de movimento, atribuindo à escolha de um referencial a interpretação do estado de um dado objeto. Mas, a partir da transição para a TRR, Cassiano deixou de apresentar as respostas da mesma maneira que antes. No próximo capítulo, quando da análise das trajetórias cognitivas, essa característica será indentificada como ponto central

da maneira como Cassiano organizou os conceitos relativísticos.

3.4.11) Continuação das atividades:

As aulas seguiram após a realização formal da pesquisa. O professor continuou a explorar outros aspectos ligados à TRR, como a contração espacial, a variação da massa com a velocidade e a relação massa-energia. Nesse sentido, a condução das aulas continuou a ter o mesmo caráter, ou seja, o professor apresentava as ideias centrais, tentava algum diálogo com a turma e propunha questões para serem resolvidas em grupo ou individualmente. Essas atividades realizadas após a décima aula se estenderam por mais um mês.

Após esse período, foi aplicada a última atividade, que serviu como uma síntese do que havia sido estudado até então: velocidade, referencial, tempo e espaço. A situação apresentada é bastante conhecida e serve como exemplo na maioria dos textos introdutórios sobre relatividade. A seguir, as duas perguntas que fazem parte dessa atividade.

- 1) O múon é uma partícula subatômica que possui um tempo próprio de vida da ordem de $2,2 \times 10^{-6}$ segundos. Ele é gerado em altas camadas atmosférica, a cerca de 10km da superfície da Terra. Esse múon é detectado na superfície da Terra. Qual deve ser, no mínimo, a velocidade do múon para que isso seja possível do ponto de vista da Mecânica Clássica?
- 2) Um dos aspectos mais interessantes da Teoria da Relatividade Especial, de Albert Einstein, é o fato de que a velocidade da luz, $3,0 \times 10^5$ km/s, ser a maior velocidade possível no universo. Como é possível ser coerente com essa regra da Teoria da Relatividade Especial e, ao mesmo tempo, explicar a detecção do múon na superfície da Terra?

Apesar de esse exemplo ser muito conhecido, o professor não trabalhou com ele pois sabia que seria objeto do problema a ser apresentado, ao final da sequência, aos estudantes. Dessa forma, ao menos de maneira formal ao longo do curso, os estudantes ainda não haviam sido apresentados ao problema e tampouco à solução do mesmo no âmbito da TRR.

A escolha feita foi a de trabalhar com o problema em duas etapas distintas e complementares. A primeira poderia ser pensada do ponto de vista clássico, calculando-se a velocidade do múon a partir da relação entre a distância percorrida (10km) e o tempo de vida da partícula (10^{-6} s). Isso daria um resultado maior do que a velocidade da luz no vácuo.

É nesse ponto que surge, de fato, o problema a ser resolvido. Como é possível ao múon ter uma velocidade menor do que a que foi calculada e, mesmo assim, chegar à superfície da Terra? Duas respostas possíveis e equivalentes poderiam ser dadas a essa questão. A primeira delas faz menção ao fato de que, do ponto de vista de um referencial fixo na Terra, o tempo de vida do múon é dilatado e, portanto, maior do que $2 \mu\text{s}$. A segunda diz que, para um referencial no múon, a distância percorrida por ele é contraída, sendo, portanto, menor do que 10 km. A curiosidade é que nenhum dos estudantes utilizou essa segunda explicação.

Lara afirmou que

“Por ele estar em uma velocidade alta, o seu tempo é dilatado, sendo assim, o seu tempo de vida, quando ele se encontra em movimento é maior, desta forma, ele pode ser encontrado na superfície. Considerando que o tempo de vida inicial do múon tenha sido calculado enquanto ele estava em repouso a 10 km da superfície da Terra”.

A última frase indica que a aluna já é capaz de apresentar respostas baseadas na relatividade do movimento.

Já Vivian não reconheceu essa característica relativa do movimento e, com isso, afirmou que

“Se tem tal partícula subatômica na superfície terrestre, o que indica é que foi atingida uma velocidade maior do que a da luz, então se contradizendo o fato da velocidade da luz ser a maior possível. Ou então essa partícula veio por outra estrutura, o que poderia se contradizer ou não o fato que Einstein propôs”.

Das outras respostas, aquelas enunciadas por Thales e Osvaldo demonstram, mais uma vez, a adesão ao modelo relativístico e serão tratadas e discutidas no capítulo seguinte.

Todos os episódios mostrados, assim como as respostas apresentadas pelos estudantes, serviram de base para que se pudesse avaliar de que maneira os estudantes organizam sua ação quando é necessário abordar problemas ligados ao movimento e ao fluxo do tempo. Como foi possível perceber, os *schèmes* de movimento e de tempo devem funcionar solidariamente para as questões ligadas à TRR, em um processo de assimilação recíproca entre eles. Isso ocorre porque as situações ligadas à Relatividade exigem o correto estabelecimento de um sistema de referência, o que está na base do funcionamento dos dois *schèmes* citados.

Se, no âmbito da MC, essa coordenação de *schèmes* revela-se desnecessária (pois o fluxo do tempo é o mesmo em todos os referenciais), na TRR ela é essencial. Dessa forma, pode-se afirmar que os estudantes como Thales, Lara e Osvaldo efetuaram a assimilação recíproca entre os *schèmes* de movimento e de tempo. Já os estudantes Cassiano e Nayara não fizeram isso.

No capítulo seguinte, serão apresentadas as trajetórias cognitivas de alguns desses estudantes.

CAPÍTULO 4 – AS TRAJETÓRIAS COGNITIVAS

Vergnaud (2012) afirma que a apropriação de diversos aspectos de um conceito é um processo complexo que ocorre durante um longo período de tempo. Durante esse tempo, o estudante utiliza seus *schèmes* com vistas a abordar e resolver situações complexas. Nesse contexto, a história das interações *schème*-situação pode fornecer os elementos para que o pesquisador interprete a maneira pela qual dado estudante se apropriou dos conceitos estudados. Isso requer, portanto, que a análise do sujeito em situação se dê em diversos momentos, a partir da investigação dos modos de organização para a resolução das atividades, dos enunciados proferidos durante as interações discursivas e das produções textuais.

Desse modo, orientado pelas questões de pesquisa, procurei investigar as trajetórias cognitivas dos estudantes ao longo da aplicação da sequência didática. A produção de cada estudante foi analisada, à luz da TCC, na busca por elementos que pudessem revelar a maneira como evoluíram os IO nas atividades de intervenção didática. Por isso, os episódios já apresentados e a produção escrita foram essenciais nessa análise.

Escolhi a análise da trajetória cognitiva de cinco estudantes por representarem toda uma diversidade de perfis, desde sujeitos mais participativos, mas com um pensamento muito arraigado nas formulações científicas, até outros que, apesar de não participarem tão ativamente nas discussões, conseguiram apresentar uma desenvoltura maior na parte escrita, com o estabelecimento de modelos complexos.

Lara é uma estudante que se vale muito das formas predicativas do conhecimento; Cassiano teve uma participação muito apagada nas discussões, mas seus modelos escritos tiveram alguma relevância para a análise; Nayara se esquivou de uma participação ativa e sua produção escrita também não estava muito avançada, apesar de conseguir, em ação, gerar algumas boas relações de analogia; Thales falou pouco, mas conseguiu formular modelos conceituais muito avançados; Osvaldo apresentou um pensamento mais criativo e um nível de conhecimento muito interessantes.

Dos outros estudantes, Antônio teve uma trajetória parecida com a de Lara. Mariana, Maria, Vivian e Clara em muito se assemelharam à trajetória de Cassiano.

4.1) Lara

Esta estudante demonstrou-se, ao longo das atividades, disposta a participar das discussões, emitindo suas opiniões e analisando as falas dos outros. De origem humilde, Lara valoriza sobremaneira a oportunidade que obteve em estudar em uma escola federal. Talvez por esse motivo ela tenha uma característica muito marcante ligada à tentativa de utilização do discurso científico, mesmo quando os conceitos não estão totalmente claros.

Essa postura pode ser verificada logo na primeira aula, quando Lara enunciou o conceito científico de referencial e sua fala refletia um bom conhecimento sobre a relatividade do movimento. Nesse contexto, Lara afirmou que referencial

“vai ser um ponto a partir do qual você ... vai ... a partir daquilo você vai fazer uma comparação com algum outro objeto ou lugar para tá tendo ... para ter uma comparação mesmo, a partir desse ponto você vai fazer uma comparação”.

É possível perceber, na enunciação da estudante uma tentativa de associar ao conceito de referencial uma característica relacional, ou seja, o referencial é usado como base para a realização de comparações.

Além disso, quando a pergunta é feita mais diretamente, sobretudo quando são abordadas situações já exploradas pelo professor (mesmo que parcialmente), Lara utiliza as formulações científicas. É o que aconteceu na resposta dada à primeira atividade escrita, quando a pergunta central era colocada sobre o movimento do Sol ou da Terra. A estudante afirma que

“quanto ao que realmente se move, não há uma verdade absoluta, sendo que ambos podem movimentar variando-se somente o referencial. Desta forma, como estamos na Terra, vemos o Sol se movimentar, mas se estivéssemos no Sol veríamos a Terra se movimentar.”

Como afirma reiteradamente Vergnaud (2013), o processo de conceitualização é oportunista, no sentido de se valer das situações enfrentadas para a construção das proposições. Nesse processo, os *schèmes* realizam o que Piaget chamou de *assimilação generalizante*, no sentido de exercitar e ampliar o próprio *schème*. O *schème* de movimento é posto em ação pela situação proposta e a estudante utiliza, nesse caso, o TEA *“o movimento é definido a partir de um referencial que pode estar em qualquer lugar”*. Isso conduz a uma resolução

satisfatória do problema por similaridade com as situações já desenvolvidas pelo professor.

No entanto, quando o foco da situação foi mudado do reconhecimento mais imediato de propriedades para a aplicação do conceito em situação, Lara demonstrou, ainda, certo distanciamento entre sua representação e as formulações científicas.

Isso pode ser percebido quando Lara responde à segunda pergunta⁸⁶ da primeira atividade de sala. Para a estudante, a afirmativa mostrada na questão era

*“verdadeira. Porque na 1ª situação A está em movimento e na 2ª situação C está em movimento. Ex: A → carro B → pessoa C → cão
1º O carro **se move** e a pessoa está **parada**
2º A pessoa **se move** e o cão está **parado**
3º O carro **se move** com a pessoa dentro e o cão está **parado.**” (grifos feitos por mim)*

A estudante relacionou os corpos dois a dois, mas não efetuou a relação completa entre os três corpos presentes. Mas, pode-se perceber que Lara atribui um estatuto epistemológico de absoluto às noções de movimento e repouso.

Além disso, na segunda atividade de sala, quando perguntada se a afirmativa do gato Garfield⁸⁷ estava correta, Lara lança mão da relatividade do movimento e explicita os referenciais necessários para a análise da situação indicada. No entanto, aparece um dado novo, ligado à ideia de que há um movimento absoluto.

*“Sim e não dependendo do seu referencial. Porque se um ser humano for observado na Terra a partir de outro planeta, o observador o verá em movimento, mas pelo fato de ele estar na Terra, **ele se movimenta junto com ela**, e por este motivo tem a **sensação** de estar parado.” (grifos feitos por mim)*

O *schème* de movimento da estudante está, nas duas situações apresentadas, em ação. No entanto, ele se vale, agora, de situações tiradas das experiências cotidianas nas quais não percebemos a Terra se mover, enquanto os outros objetos (carros, pessoas, etc.) são vistos em deslocamento.

⁸⁶ A afirmativa era: “Se A está em movimento em relação a B e B está em movimento em relação a C, então A está em movimento em relação a C”. Com isso, era perguntado se a afirmativa era correta.

⁸⁷ Garfield afirma, no *cartoon*, que está em movimento porque a Terra move-se em torno do Sol.

Nesse sentido, o TEA que pode ser inferido é “o movimento ocorre a partir da mudança da posição em relação à Terra”. Essa é a maneira pela qual ela operou com o CEA referencial nas situações anteriores.

Há, aparentemente, uma contradição entre os dois TEA já apresentados. O primeiro, mais ligado a uma formulação científica e o segundo, mais associado a situações cotidianas e, por isso, mais distanciados do modelo físico de movimento.

Em uma primeira abordagem, essa diferença de comportamento da estudante poderia ser estudada a partir da Teoria dos Perfis Conceituais (MORTIMER, 2000), dizendo que Lara utilizou duas diferentes zonas de seu perfil conceitual de movimento (AYALA FILHO, 2010). Mas, resta ainda a explicação sobre o que causou essa transição e como acessar uma e outra zona.

Nesse ponto, creio que a TCC, com a sua formulação de *schème* permite ir além. Nesse sentido, as regras de tomada de informação do *schème* de movimento da estudante selecionam, dentre os fatos assimiláveis, quais são os elementos essenciais à ação. A partir daí, por similaridade entre o que Lara já conhece e quais são os dados da situação, os CEA são selecionados e articulados nos TEA.

Entretanto os conhecimentos que estão contidos nos *schèmes* – os CEA e TEA – são múltiplos, variados e, às vezes, incompatíveis. Isso é próprio do processo de conceitualização, em que diversos modelos conceituais coexistem dentro de um sistema e podem ser utilizados em função da situação. De toda uma miríade de possibilidades, pode-se dicotomizá-los em conhecimentos predicativos e conhecimentos operatórios (VERGNAUD, 2007 e 2009b). É a interação entre o *schème* de movimento e a situação que poderá indicar se os conhecimentos mobilizados pela aluna serão mais próximos de uma formulação mais predicativa ou operatória.

A primeira interação discursiva entre Lara e o professor e a primeira atividade escrita, de certa forma, eram conhecidas pela estudante por já terem sido trabalhadas (seja em séries anteriores ou pelo próprio professor, durante a explicação). A orientação do seu *schème* de movimento foi em direção aos conhecimentos de cunho mais predicativo.

Mas, em situações que apresentam uma característica mais inusitada – não ligadas diretamente a um contexto já ensinado – ou mais próxima das vivências cotidianas, a maneira pela qual os conhecimentos utilizados terão um aspecto mais

ligado às formulações já construídas e, de certa forma, consolidadas pela estudante, ou seja, seus conhecimentos na forma operatória.

Isso pode ser percebido tanto na atividade dos três corpos quanto na análise da afirmativa do Garfield. Mesmo que haja um discurso no qual ela revela que os movimentos são relativos, quando chamada a interpretar situações problema inusitadas, ela recorre a Terra como uma espécie de referencial mais confiável para o estudo dos movimentos.

Continuando essa análise, na quarta aula, durante a interação discursiva entre o professor e a turma, ocorre mais uma indicação desse fato. Quando o professor apresenta um problema ligado ao comportamento de uma bola dentro de um ônibus que freia, Lara mostra, mais uma vez, uma formulação muito ligada a um referencial absoluto, quando ela afirma que “*você não percebe o movimento do ônibus porque você tá dentro do ônibus e tá em movimento junto com ele*”.

Os dois tipos de ação são importantes e relevantes. No primeiro caso, a utilização consciente de formulações mais predicativas cumpre as funções de contribuir para uma assimilação de situações que apresentem um pequeno grau de diferenciação em relação ao *schème* utilizado – no caso, o de movimento – e de contribuir para a tomada de consciência das possibilidades de utilização de formulações conceituais ainda não consolidadas. Portanto, esse é um passo importante do processo de conceitualização.

Já no que se refere à forma operatória do conhecimento, a colocação em cena de situações inusitadas permite investigar o nível atual do desenvolvimento da estudante. Nesse sentido, esses conhecimentos são como uma base para ação, permitem à estudante propor caminhos para a resolução dos problemas e indicam, em última análise, quais as possibilidades mais imediatas de novos aprendizados.

Importante de se notar que o *schème* de movimento da estudante já mostra uma descentração no sentido de que ela não analisa o deslocamento dos objetos a partir de si mesma. Mas, ela não realiza, ainda, operações totalmente reversíveis, no sentido de que a relação entre os referenciais é assimétrica. Lara omite o referencial utilizado quando se trata da Terra, mas não o faz para outros casos. Parece que a estudante efetuou uma substituição do “eu próprio” pela Terra como ponto de vista privilegiado. Esse é, conforme apresentado, uma etapa intermediária entre a análise egocêntrica e a total descentração. Em comum a todas essas situações, essa

organização da ação de Lara busca sempre o maior corpo presente na situação para ser o referencial verdadeiro.

Logo após a apresentação dos postulados da TRR, os estudantes realizaram a quarta atividade de sala, em que era solicitado que se determinassem velocidades relativas entre duas pessoas e entre uma pessoa e um raio de luz. Nessa atividade, foi possível perceber a forma como a estudante lança mão de um novo sistema de regras para resolver situações apresentadas de forma muito direta, pois a atividade proposta era uma aplicação mais direta do segundo postulado da TRR.

A interpretação das respostas de Lara evidencia, mais uma vez, a utilização dos conhecimentos em sua forma predicativa. Como a atividade estava profundamente associada a essa forma de conhecimento, a realização foi fácil para Lara, a despeito da incorreção na operação matemática ($0,8 \times 2 = 2,4$) na terceira questão⁸⁸. Nela, a estudante revela que

“Deveria ser $2,4c$ <<no original, há uma rasura que, segundo a estudante era o resultado de $1,6c$ que ela havia encontrado e depois, não sabe o porquê, alterou>>. Com certeza causa espanto pelo fato de que o valor encontrado seria maior que a velocidade da luz, o que seria impossível segundo o 2º postulado de Einstein que diz que a velocidade da luz é absoluta”

É de se notar a utilização de um argumento de autoridade em um discurso que utiliza palavras do mundo científico para ratificar seu ponto de vista. No entanto, após a exposição sobre a dilatação temporal, quando da sexta atividade de sala, Lara se vale do que havia aprendido sobre o tempo relativo como uma explicação causal para todas as questões.

A resposta à primeira questão, que indagava o motivo pelo qual um robô em Marte não poderia ser controlado a partir da Terra, não está relacionada com a dilatação temporal e, sim, ao fato de que a velocidade da luz, apesar de grande, não ser infinita. Mas Lara entendeu que, como se tratavam de dois planetas distintos, os tempos deveriam ser diferentes aqui na Terra e em Marte e identificou esse fato como sendo a razão para não se poderem controlar robôs em tempo real.

⁸⁸ Essa questão solicita ao estudante que determine a velocidade relativa entre um objeto que se aproxima de um espelho plano com uma velocidade de $0,8c$ (medida em relação ao espelho) e a sua própria imagem.

“Pelo fato do tempo na Terra ser diferente do tempo de um corpo em velocidades próximas a velocidade da luz, velocidade esta que os robôs possuem quando entram em órbita”

Essa situação permite a interpretação de que a aluna torna absoluta a relatividade do tempo. Para Lara, cada corpo possui o seu tempo próprio que será diferente dos outros em função da velocidade que cada um possui. Ou seja, os tempos são relativos à velocidade, mas esta é tomada como medida a partir de um referencial privilegiado (no caso da situação descrita, a Terra), em qualquer situação.

Na resposta apresentada à segunda questão da última atividade, aquela relacionada ao motivo pelo qual o múon poder ser detectado na superfície da Terra, Lara afirma que

“Por ele estar em uma velocidade alta, o seu tempo é dilatado, sendo assim, o seu tempo de vida, quando ele se encontra em movimento é maior, desta forma, ele pode ser encontrado na superfície. Considerando que o tempo de vida inicial do múon, tenha sido calculado enquanto ele estava em repouso a 10 km da superfície da Terra”.

Parece-nos que o CEA de intervalo de tempo relativo como algo que possui um fluxo diferenciado em locais distintos foi utilizado por Lara no reconhecimento das situações e permitiu a ela extrair as informações que julgava importantes.

Esses conceitos estão relacionados a um TEA como o que se segue: “*o fluxo do tempo é mais lento para referenciais em movimento do que para referenciais em repouso*”.

Ao dizer isso, quero identificar que Lara não faz menção à relatividade do tempo como uma comparação entre dois referenciais, cada qual fazendo suas medições de tempo para a ocorrência de certo fenômeno. Pelo contrário, ela chega a afirmar que se a medida do tempo de vida do múon for feita com ele em repouso (sem identificar em relação a que), teremos um resultado. Se for feita com ele em movimento (novamente, sem identificar qualquer referencial), a medida é outra. Ou seja, em cada caso, o mesmo múon medirá tempos distintos.

É de se notar que esse TEA está profundamente ligado com o que foi anteriormente explicitado. A existência de um referencial absoluto para o estudo dos movimentos implica que as conclusões sobre a existência ou não de um tempo dilatado dependem do movimento em relação a esse referencial.

Esse é um importante indício de que a estudante, durante o aprendizado da TRR, conseguiu desenvolver seu *schème* de tempo, assimilando a ele o *schème* de movimento. Dizendo de outra maneira, a forma pela qual Lara significou a existência de um tempo relativo foi agregando a ele a necessidade do estabelecimento de um referencial. Mas, como o *schème* de movimento organizava as ações em torno da escolha de um referencial privilegiado, esse TEA foi assimilado ao *schème* de tempo.

Outra característica marcante na trajetória da estudante é tentativa de adequação da sua fala ao que ela julga ser mais condizente com uma aula de Física. Isso torna-se particularmente mais evidente quando, ainda no turno T34, Lara enuncia que “... *vai cessando o movimento, que você continua ... tende <<reforço na fala>> a permanecer em movimento.*”

Quando perguntada sobre se a relatividade do tempo é real ou algo que faz sentido matematicamente, mas que não representa a realidade, Lara indica que deve ser verdade, do contrário, os cientistas não iriam pesquisar. Percebe-se uma tentativa de valorizar o conhecimento científico como algo “bom”, útil e que é feito com a intenção de descrever a realidade.

Em resumo, a trajetória cognitiva de Lara apresentou três grandes características que podem ser assim resumidas:

- A) Utilização de enunciados que se parecem científicos sempre que possível, o que influenciou sobremaneira sua produção escrita e verbal quando se tratava de situações mais diretamente ligadas a um conhecimento predicativo. Essa característica se mostrou decisiva na construção de uma relação ambígua sobre o tempo relativo.
- B) Atribuição, em ação, de um significado intermediário para a noção de relatividade do movimento. Lara considerou, durante todo o período analisado, que o movimento poderia ser relativo quando visto “localmente”, ou seja, quando estudado em relação a objetos de tamanhos parecidos (duas pessoas, um carro e uma pessoa, etc). Mas, quando analisado em uma amplitude maior, há um referencial privilegiado que estabelece quais são os movimentos verdadeiros e aqueles outros que são mera impressão. Esse referencial privilegiado, por sua vez, pode mudar em cada situação estudada, mas possui uma característica de ser, sempre, um corpo cujas dimensões são muito maiores do que as dos outros. Por exemplo, para a análise dos

movimentos que ocorrem na superfície da Terra, o referencial privilegiado é a própria Terra. Mas, para a análise do sistema solar, o Sol desempenha esse papel. Se a conduta de Lara não revela, totalmente, características do egocentrismo clássico piagetiano, no sentido de que ela consegue analisar as situações a partir de sistemas de referências externos a si, também é verdade que a aluna ainda necessita atribuir um ponto de referência absoluto para cada situação, mesmo que este possa ser mudado em cada problema, o que denota uma causalidade centrada em aspectos mais diretamente percebidos das situações em jogo. É preciso, portanto, “relativizar” a afirmação de Lara de que o movimento é relativo.

- C) A construção da noção de tempo relativo feita pela estudante foi um produto da sua necessidade de atribuição de sistemas absolutos em cada situação. Conduzido, ainda, por uma concepção de que a ciência se preocupa em estudar coisas que são úteis, a estudante creditou à dilatação do tempo uma existência física real, embora possa ainda não compreender totalmente o significado desse fenômeno. Assim, ao longo da sua trajetória cognitiva, o CEA de referencial, com o significado epistemológico misto entre algo relativo e absoluto, foi decisivo na construção da noção de tempo relativo. Dizendo isso, quero indicar que os problemas de compreensão dessa noção científica de tempo relativo não são totalmente ligadas às dificuldades inerentes ao campo conceitual da TRR, mas possuem suas raízes em uma atribuição ainda parcial ao conceito de “relatividade”. São necessárias, ainda, muitas atividades que possam exigir da estudante a utilização do *schème* de movimento tal qual ela vem utilizando para que ela possa construir e consolidar a noção de movimento relativo.

4.2) Cassiano

Desde o início das atividades, Cassiano apresentou uma postura mais passiva. Somente respondia ao que era perguntado diretamente pelo professor e não manifestava seus pontos de vista verbalmente. E, mesmo quando falava algo,

usava poucas palavras, como se pode perceber no turno T6 da primeira aula⁸⁹. Por isso, a análise de sua produção está muito centrada em sua produção escrita.

Na primeira atividade escrita, sobre o texto de Millor Fernandes, Cassiano conseguiu apresentar um modelo cientificamente correto frente à relatividade do movimento, quando afirmava que

“Millor Fernandes expressa a opinião dele, e também pode ser aceita desde que ele tenha classificado a Terra como ponto de referência. Galileu também está certo pois ele considerou o Sol como referência. Para Millor, a Terra está parada e o Sol se movimenta ao redor dela; para Galileu o Sol está parado e a Terra está em movimento.”

É de se notar que essa produção se aproxima de um discurso escolar muito próprio da análise dos referenciais. Portanto, a análise da segunda pergunta dessa atividade torna-se essencial para concluir se ele é capaz de resolver situações práticas com esse conceito de relatividade do movimento.

Em sua resposta à segunda questão⁹⁰, Cassiano afirma que “*Nem sempre. A pode estar em movimento em relação a C, pois A pode estar em repouso em relação a C e B pode estar em movimento em relação a A e C.*”

Percebe-se, aqui, um indicativo interessante de que Cassiano poderia utilizar a ideia de movimento relativo. Isso ainda é reforçado quando analisamos a sua produção na segunda atividade, sobre a questão da tirinha do Garfield. “*Sim, Garfield teve que considerar o referencial em outro local que não seja a Terra, sendo assim, Garfield está em movimento*”.

É possível verificar, portanto, uma coerência nas produções escritas que pode nos levar a inferir que o TEA utilizado na abordagem e solução desses problemas diz que “*movimento é uma mudança de posição em relação a um referencial cuja escolha é arbitrária.*” Esse TEA é mais próximo das formulações científicas do que o de Lara, visto que amplia a ideia da relatividade do movimento como um fato e, não somente, como uma impressão. Dessa forma, o seu *schème* de movimento conduz ao estabelecimento de comparações entre as posições dos corpos estudados e um referencial escolhido não importa onde.

⁸⁹ <<referencial>> “É um ponto ... inicial ... que você vai tirar conclusões sobre ... ele.”

⁹⁰ A afirmativa era: “Se A está em movimento em relação a B e B está em movimento em relação a C, então A está em movimento em relação a C”. Com isso, era perguntado se a afirmativa era correta.

Outra possibilidade de interpretação, também válida, é que as situações apresentadas até então ajudaram o estudante a mobilizar conhecimentos mais predicativos sobre a relatividade do movimento. O *schème* de movimento do estudante coloca como mecanismo de coleta de informações o CEA de referencial, com um estatuto epistemológico de um objeto qualquer. A partir daí, o TEA “*o movimento é relativo à adoção de um referencial qualquer*” é uma utilização mais formal dos conceitos que acabaram de ser ensinados pelo professor.

A diferença central entre essas duas interpretações é que, na primeira, mesmo que Cassiano não tenha total consciência, sua maneira de agir em situações relacionadas ao movimento é guiada por uma concepção de movimento relativo, enquanto que, na segunda, a relatividade do movimento é enunciada a partir de um conhecimento externo ao estudante, sendo, portanto, uma adaptação do discurso escolar⁹¹.

Um pequeno turno de fala, durante o debate que ocorreu entre alunos, professor e pesquisador na quinta aula, pode ajudar na interpretação. No momento indicado, o pesquisador havia proposto um problema, até então desconhecido dos alunos, que era o de conceber um experimento a ser feito em um ônibus em repouso ou em movimento retilíneo uniforme em relação a um sistema de referência inercial, cujo resultado pudesse indicar em qual das duas situações ele está.

Quando os alunos chegaram à conclusão de que tal distinção era impossível, Cassiano concluiu, dizendo que “*talvez não seja porque a gente sempre esteja em movimento?*”. O aluno apresenta, aqui, uma concepção diferente das outras formulações já indicadas. Em primeiro lugar, porque ele não indica qualquer referencial para a sua afirmativa, sugerindo a existência de um movimento verdadeiro, em detrimento de outros que são impressões. Depois, porque a afirmativa é categórica ao indicar que estamos *sempre* em movimento e que é justamente isso que não nos permite distinguir o repouso do movimento uniforme em linha reta.

Dessa forma, das duas interpretações que apresentei, julgo que a segunda seja a mais coerente. Cassiano opera com dois níveis de explicação, em função do

⁹¹ Esse cuidado de interpretação é essencial porque, nas duas interpretações, os resultados obtidos são idênticos. Por isso, a necessidade de um número maior de atividades e da análise do sujeito em situação para uma análise mais pormenorizada da trajetória de Cassiano.

que a situação evoca, o que se aproxima do que faz Lara. Esses dois níveis são como dois sub-*schèmes* do *schème* de movimento. Quando as situações propostas são mais semelhantes àsquelas utilizadas pelo professor, o sub-*schème* de movimento como algo relativo é ativado e, dessa forma, o CEA de referencial como um elemento para comparação de posições conduz ao reconhecimento de que todos os corpos podem ser utilizados como sistema de referência. Nas situações em que Cassiano não consegue estabelecer uma relação imediata com outras já reconhecidas como pertencentes ao domínio escolar, o sub-*schème* de movimento tendo um referencial privilegiado entra em cena. Nesse caso, o CEA de referencial não é mais decisivo, pois o que importa é extrair as informações relativas às velocidades medidas em relação a um sistema de referência tacitamente aceito como válido (e que pode ser a Terra ou o Sol, por exemplo).

Na atividade três, os estudantes estavam organizados em trios. Foi apresentado o paradoxo do espelho como uma maneira de efetuar a distinção entre o repouso e o MRU. Essa questão propunha aos estudantes que construíssem uma explicação fisicamente coerente para a situação.

A resposta de seu grupo indicava que

“Se a pessoa e o espelho se movimentarem em MRU para direita na velocidade da luz, a imagem da pessoa não será refletida, como a luz não recebe influencia (sic) da velocidade de seu emissor, ela sempre irá viajar a uma velocidade C . Com o espelho na velocidade C , a luz e o espelho não se encontrarão, não formando o reflexo no espelho. Assim, aplicar os princípios mecânicos na luz é relativo, pois só podem ser usados tais princípios com corpo ou matéria influenciável por contatos mecânicos. A luz como onda eletromagnética não sofre influencias (sic) externas.”

Parece-me que, ou o grupo não entendeu o problema que foi apresentado, ou tentou negar a existência de um problema conceitual. Essa saída encontrada, a de colocar a luz como algo que não se encaixa na regra geral indica uma tentativa de isolar o problema e analisá-lo dentro de um contexto específico (“*Assim, aplicar os princípios mecânicos na luz é relativo, pois, só podem ser usados tais princípios com corpo ou matéria influenciável por contatos mecânicos*”).

Esse tipo de comportamento se assemelha ao que foi classificado como conduta alfa por Piaget e Garcia (2011) e pode indicar a utilização de um *schème* muito comum de resolução de problemas abertos, que se vale de regras de ação já

conhecidas. Quando tais regras não dão o resultado esperado, constrói-se um novo campo de validade para o dado/objeto anômalo.

Após a explicação, por parte do professor, dos postulados da TRR, os estudantes resolveram a quarta atividade de sala, com questões de aplicação. Nessas questões, era necessário usar o caráter absoluto da velocidade da luz. Essa ideia parece ter sido muito pouco frutífera para Cassiano, visto que ele a ignorou nas respostas dadas às questões 2 (determinação da velocidade relativa entre uma pessoa e um raio de luz) e 3 (análise da velocidade relativa entre uma pessoa e sua imagem produzida por um espelho plano).

É de se notar que a ideia do movimento relativo parece ser mais forte que a nova ideia apresentada pelo segundo postulado da TRR. Para determinar a velocidade relativa entre um feixe de luz e um observador, Cassiano usa o modelo clássico de soma de velocidades de Galileu ($c + V_M$ quando as velocidades estão em sentidos opostos; c quando a moça está parada e $c - V_M$ quando as velocidades estão no mesmo sentido). Essa resposta reforça a ideia de que Cassiano se valeu do sub-*schème* de movimento relativo, mas, nessa situação, não levou em consideração as formulações da TRR.

Além disso, sua resposta na questão 3 é muito confusa pois ela não repete o padrão mostrado nas perguntas 1 e 2: *“A velocidade deveria ser V pois se no lugar de um espelho houvesse um observador ele veria a pessoa distante e logo em seguida perto sem a ver se aproximando.”*

A pergunta era sobre a velocidade do objeto em relação à imagem em um espelho plano e Cassiano respondeu qual deveria ser a velocidade do objeto em relação ao espelho. Não foi possível saber, portanto, se a confusão apresentada devia-se a um TEA falso ou à não compreensão da pergunta. No entanto, a partir das duas respostas anteriores, acredito que essa segunda alternativa seja a mais provável.

Na atividade realizada em trios (sobre o paradoxo do espelho), o grupo de Cassiano afirmou que a luz é um caso à parte na Mecânica. No entanto, ele usa a composição de velocidades de Galileu para a soma de velocidades entre a luz e uma pessoa. Já em relação à velocidade entre uma pessoa e a sua imagem em um espelho, o modelo utilizado é diferente.

Cassiano, ainda não havia desenvolvido TEA que dessem conta dessas novidades, tampouco era capaz de usar CEA pertinentes para reconhecer as

situações em que a TRR deveria ser usada como referência conceitual para a abordagem e resolução dos problemas. Dessa forma, em grande parte, as situações escolhidas para a mediação didática e para a resolução dos problemas foram reconhecidas por Cassiano como pertencentes ao domínio da MC e, assim, os CEA permaneceram, de certo modo, inalterados. A análise das respostas seguintes dão fortes indícios de que essa interpretação é verdadeira.

Na atividade 5⁹², realizada em trio, Cassiano responde corretamente às duas questões, indicando uma boa interpretação sobre a questão da simultaneidade. Para a segunda pergunta, que questionava se a diferença de intervalos de tempo, percebidos na experiência imaginada de um trem viajando com velocidade próxima à da luz, era semelhante àquela existente entre os tempos para ver um raio e ouvir o consequente trovão, os estudantes afirmam que

“Não. A simultaneidade não ocorre não só pelo fato de serem tipos de ondas diferentes, a situação também é. Na primeira as ondas seguem para pontos diferentes, já na segunda situação ambas as ondas seguem para um mesmo ponto. A diferença de velocidade causa a diferença de percepção.”

No entanto, a atividade seis não foi bem aproveitada, uma vez que suas respostas foram muito evasivas. Por exemplo, na segunda questão dessa atividade, que pergunta se um recém-nascido poderia chegar vivo a um planeta que se localiza a 10 000 anos-luz da Terra, Cassiano afirma que *“Não, a menos que existissem maneiras de viajar no espaço mais sofisticadas.”*

O que estava em jogo nessa questão não era um aspecto tecnológico (formas de viajar mais sofisticadas) e, sim, a possibilidade de haver a dilatação temporal. Uma pessoa dentro de uma nave em grande velocidade poderia perceber seu tempo de vida normal para um ser humano, enquanto que esse tempo poderia ser muito grande na Terra. Isso porque a distância de 10 000 anos-luz foi medida em relação à Terra.

A maneira como Cassiano apresentou sua resposta não permite concluir qual foi o modelo utilizado. Parece-me que sua explicação deixa de lado as

⁹² São apresentadas duas questões que tratam da relatividade da simultaneidade. A primeira trata de uma situação teórica, relacionada a uma nave que se desloca em relação a uma plataforma. Há dois emissores de sinais de celular e dois observadores com celulares, um na nave e o outro na estação. A segunda questão pergunta se a diferença entre o tempo para ver um raio e ouvir o trovão correspondente é da mesma natureza da relatividade da simultaneidade descrita na TRR.

características conceituais e parte para questões tecnológicas. Se for esse o ponto, poderia haver, por parte de Cassiano, um tipo de raciocínio que não revela compromisso epistemológico com a TRR.

Outra possibilidade de interpretação está ligada à natureza da própria pergunta. Ela traz implícita uma intenção de não considerar o contexto e possibilidades reais da ação descrita pela situação problema. Ou seja, ela solicita uma adesão do estudante a um estado suposto de coisas para daí deduzir consequências. Nesse sentido, as características do discurso educacional, tal como proposto no problema, podem não ter sido compreendidas pelo Cassiano.

Ao analisarmos a resposta dada à questão seguinte, podemos encontrar um argumento favorável à primeira interpretação. Isso porque a não consideração dos constructos centrais da TRR em respostas pode, também, ser verificada na resposta à questão que explora a análise do quadro “A persistência da memória”, em que Cassiano afirma que

“A obra transmite a ideia de que o tempo é sempre o mesmo, de que não podemos controlar. A teoria da relatividade mostra que é possível que o tempo seja alterado.”

Percebe-se até aqui que, ao contrário do que ocorreu com Lara, Cassiano não procedeu à assimilação recíproca entre os *schèmes* de movimento e de tempo. Provavelmente, porque os novos conhecimentos ligados à TRR não provocaram desequilíbrio, ou seja, o aluno não reconheceu os problemas ligados à incompatibilidade entre a MC e o Eletromagnetismo como problemas verdadeiros. Assim, o tempo relativo não é algo operacional para Cassiano

No entanto, ao responder à atividade sobre o tempo de vida do múon, Cassiano escreve que

“Como o tempo é relativo a velocidade próxima a da luz para nós a vida do múon é de $2 \cdot 10^{-6}$ segundo só que em altas velocidade para nós o múon demora mais tempo do que o seu tempo de vida”.

Essa resposta revela maior adesão ao modelo da TRR e suas consequências. A atividade apresenta uma situação nova, para a qual não se forneceu qualquer indicação sobre o modelo a ser utilizado, como também ocorreu com a atividade do paradoxo do espelho. Há, no entanto, duas diferenças principais. A primeira refere-se ao fato de a atividade do espelho ter sido feita em grupos e a do múon,

individualmente. A segunda diferença é o nível de conhecimento que já foi trabalhado com os estudantes, pois ela foi realizada após o todo o estudo da TRR. Isso pode ter fornecido mais elementos para a utilização dos modelos da TRR na última atividade.

Para resolver corretamente da última atividade, é necessário que se reconheça a inoperância do modelo mecânico clássico *frente* às situações e se faça uma opção por determinado modelo explicativo. Esse processo foi feito por Cassiano que indicou, inclusive, em qual referencial é visto o tempo dilatado.

Concluindo essa análise, afirmamos que Cassiano, ao final das atividades de pesquisa, demonstra utilizar, mesmo que parcialmente, o *schème* de tempo para a resolução dos problemas ligados a situações mais distantes do cotidiano. Assim, é possível perceber dois pontos principais na trajetória cognitiva de Cassiano.

- A) Existência de um *schème* de movimento, que orienta a busca por um sistema de referência para analisar deslocamentos. Esse *schème* comportava dois sub-*schèmes* distintos, cada um deles associado a um grupo de invariantes operatórios. Esses sub-*schèmes* eram utilizados por Cassiano em função da natureza da situação a ser enfrentada.
- B) Resistência em utilizar os construtos da TRR durante a fase em que tal campo conceitual estava sendo ensinado. Nesse sentido, parece-nos que a estratégia didática de explorar pontos de tensão entre a MC e o Eletromagnetismo não foi satisfatória para Cassiano. O estudante continuou a utilizar os fundamentos clássicos para abordar os problemas ligados à relatividade.
- C) Cassiano não parece ter realizado a assimilação recíproca entre os *schèmes* de movimento e tempo e continuou a enfrentar as situações apresentadas pela relatividade a partir da utilização dos conceitos da MC.

4.3) Nayara

A participação de Nayara nas discussões promovidas pelo professor foi muito pequena, resumindo, quase sempre, a episódios curtos e com alguma dificuldade de expressão de suas ideias.

As respostas dadas por Nayara aos questionamentos do professor procuravam, sempre que possível, repetir termos científicos, o que denota uma

tentativa de utilização da forma predicativa do conhecimento. Apesar dessa tentativa de repetição, Nayara não parecia ter se apropriado dos significados do que enunciava.

Quando questionada sobre o que é uma partícula, a estudante relata que: “Ah, eu acho que pode ser o contrário de um corpo extenso.” Em seguida, o professor a questiona sobre o que seria, então, um corpo extenso. Nayara responde que “Eu não sei ... É porque eu já vi isso no começo ... do ano... de partícula, né ... e corpo extenso estava ligado.”

Mesmo em textos escritos, a organização das ideias apresentava algumas características caóticas, como a resposta dada à questão sobre o texto do Millor Fernandes.

“É um texto bem de opinião mesmo, pois basicamente depende do referencial. Como dito no texto vemos o Sol nascer e a se por do outro lado concluindo-se então que o movimento é especificamente do Sol. Mas há quem acredita ou que a Terra gira em torno do Sol, pois ao imaginarmos em torno, imaginamos um corpo bem maior. Como não vemos o Sol maior que a Terra, há quem acredite que a mesma faz o movimento, mas quem gira mesmo é a Terra.”

Mesmo que Nayara mostre alguma familiaridade com o conceito de referencial, esse conhecimento acontece apenas em sua forma predicativa. Na primeira frase do texto acima, a aluna afirma que a questão do movimento ser do Sol ou da Terra “*basicamente depende do referencial*” para, na última frase, dizer que “*quem gira mesmo é a Terra*” (grifo nosso). Essa aparente contradição entre as afirmativas demonstra que ela não reconhece a relatividade do movimento como algo que faz parte do funcionamento da natureza já que ela não apresenta um compromisso epistemológico com a utilização da noção de referencial.

O *schème* de movimento revelado pela estudante está associado à procura do maior corpo presente na situação. Nesse sentido, o CEA de referencial possui a característica de ser esse corpo de maiores dimensões. Em consequência, há dois tipos distintos de movimento. Os que se realizam em relação a esse corpo maior – o referencial verdadeiro – que são verdadeiros e os outros que são feitos entre corpos de dimensões semelhantes, que podem até ser considerados, mas que não são reais.

Nesse sentido, é possível perceber a ocorrência de dois TEA importantes:

- 1) O movimento real é feito a partir do maior corpo presente.

2) Os movimentos feitos em relação a outros corpos não são reais.

A resposta dada à segunda atividade de classe acaba por reforçar essa interpretação. Respondendo se o personagem Garfield estava certo ao dizer que a Terra gira em torno do Sol, ela responde que “*Sim. A Terra gira em torno do Sol, como nós e Garfield vivemos nela, estamos em movimento.*” O referencial verdadeiro para Nayara é o Sol. Por isso, a Terra gira em torno dele.

Quando da realização da terceira atividade, que era em grupo (juntamente com Antônio e Cassiano), Nayara não participou das discussões, cabendo a Antônio e Cassiano a tarefa de conduzir a resolução dos problemas. A resposta dada, portanto, pode dizer muito pouco do que ela, de fato, estava pensando.

É interessante notar que Nayara apresenta respostas cientificamente corretas a todas as perguntas da 4ª atividade, justamente aquela que requer a aplicação de algoritmos previamente ensinados.

No problema 1, requeria-se a utilização da soma de velocidades de Galileu para determinar a velocidade relativa entre duas pessoas. Nesse caso, Nayara conseguiu reconhecer corretamente as situações e utilizar as sequências de passos correta.

Já no problema 2, um raio de luz estava no lugar de uma das pessoas e a estudante conseguiu identificar isso e utilizar o segundo postulada da TRR para resolver a situação.

O terceiro problema versava sobre a velocidade relativa entre a pessoa e sua imagem no espelho. Em sua resposta, Nayara afirmou que a velocidade da imagem em relação à pessoa seria igual a c . Nayara organizou sua atividade a partir do CEA de imagem como formada a partir de luz. Dessa forma, o TEA utilizado está muito próximo do segundo postulada da TRR. Por isso, resolveu esse problema como se fosse idêntico ao problema 2.

No entanto, não parece haver por parte da estudante uma compreensão satisfatória sobre os conceitos centrais da TRR. O que se pode dizer é que Nayara age em busca da resposta esperada, procurando repetir as regras, as leis, os algoritmos em exercícios que ela acredita serem semelhantes. Essa postura, muito comum em estudantes, é a de reproduzir a resposta que julgam ser a correta sem se posicionar frente a ela ou examinar suas consequências.

Em suas atividades, é possível perceber a utilização de um TEA do tipo “*o caráter absoluto da velocidade da luz é causa dos efeitos relativísticos.*”

Parece ser esse o TEA utilizado por Nayara frente à atividade 6. Na resposta à primeira questão, ela indica que

“A Relatividade Especial prevê que um relógio a bordo em Marte não marcará o mesmo intervalo de tempo que outro relógio em repouso na superfície da Terra → condições de funcionamento e sincronizados anteriormente. Essa dilatação temporal não é notada por nós e nem por relógios. Na teoria da relatividade cada observador tem sua própria medida de tempo.”

A situação proposta – a impossibilidade de se controlar, a partir da Terra, um robô que esteja em Marte – não se deve à dilatação do tempo, mas ao fato de que a velocidade da luz não ser infinita. No entanto, essa grande novidade trazida pela relatividade – o caráter absoluto da velocidade da luz – soa mais forte como uma causa para os fatos que parecem pertencer ao campo conceitual da relatividade.

Dessa forma, o CEA de velocidade absoluta da luz conduz ao estabelecimento de um TEA parcialmente verdadeiro : “Na teoria da relatividade, cada observador tem sua própria medida de tempo.” No entanto, o caráter absoluto da velocidade da luz não é pertinente à resolução dessa situação, uma vez que não considera que a relatividade do tempo nos diferentes referenciais depende da velocidade de seu deslocamento relativo. Por isso, a estudante não obteve sucesso.

Quando perguntada sobre a possibilidade de uma criança recém-nascida chegar a um planeta distante 10 000 anos-luz da Terra ainda vivo a resposta foi simplesmente: *NÃO*.

A terceira pergunta dessa atividade, relativa ao quadro de Salvador Dalí, teve uma resposta que destoou da forma como Nayara vinha se colocando nas outras atividades.

“No quadro são representados relógios (tempo). Não interessa qual seja o fenômeno físico a ser estudado, os referenciais se equivalem para o estudo. Entre esses relógios não há um referencial inercial privilegiado para a abordagem de um fenômeno físico. Eles são equivalentes entre si.”

Uma vez que o problema solicitava claramente uma relação entre o quadro e a TRR, Nayara parece ter utilizado formulações de cunho mais predicativo para construir sua resposta. No caso, a relação feita foi com o primeiro postulado da TRR, que afirma serem equivalentes todos os referenciais inerciais. De fato, uma interpretação possível para a tela de Dalí é dizer que há vários referenciais distintos,

mas sem qualquer destaque a um deles. Nesse sentido, os diversos referenciais são equivalentes entre si para a medida de intervalos de tempo.

Já na última atividade, Nayara apresentou uma explicação muito parecida com o que Lara utilizava na resolução dos problemas. Ao afirmar que o múon pode ser detectado na Terra “*pelo fato de o tempo na Terra (2×10^{-6}) ser maior*”, a estudante faz uma análise que não considera os referenciais em jogo e afirma que o tempo da Terra é maior, conferindo um caráter absoluto para a relatividade do tempo.

Enfim, a conclusão principal a que se pode chegar é que as metas e os objetivos que guiam a organização das atividades de Nayara estão ligadas à necessidade que ela percebe de fornecer uma resposta esperada pelo professor. Por isso, ela faz opção por se valer da forma predicativa do conhecimento, procurando reconhecer, nas situações, quais seriam as formulações científicas relevantes.

Não se percebe o desenvolvimento do *schème* de tempo, tampouco a integração com o de movimento. O próprio *schème* de movimento está ainda muito pouco desenvolvido desde o início da pesquisa. Nayara começa as atividades sem uma organização completa da atividade que a faça identificar um referencial para o estabelecimento dos deslocamentos. Por isso, o CEA de referencial é atribuído ao maior corpo presente e o TEA que indica que a análise do movimento deve ser feita a partir desse corpo, conferindo um estatuto epistemológico absoluto à noção de movimento.

Sem compreender corretamente os fundamentos da MC, a estudante não percebeu a contradição conceitual entre esta e o Eletromagnetismo e, portanto, a intervenção didática do professor não foi, para ela, significativa. Por isso, o *schème* de tempo permaneceu desconectado do de movimento e a estudante não utilizou os conceitos de referencial ou de velocidade.

4.4) Thales

A postura de Thales foi retraída em todas as atividades, raramente se oferecendo espontaneamente para expor seus pontos de vista. A participação desse estudante só acontecia quando instigada pelo professor ou quando a discussão com os colegas era necessária.

Apesar disso, as concepções de Thales e sua capacidade de abstração eram muito boas, permitindo que ele tirasse algumas conclusões interessantes, mesmo que, às vezes, ele não conseguisse explicitar o motivo. É o que se pode perceber quando os estudantes deveriam explicar o chamado paradoxo do espelho na aula 6.

Segundo o estudante, deveria haver alguma coisa que impedisse um objeto material de atingir a velocidade da luz para que não houvesse o problema entre o Eletromagnetismo e a MC. Na base desta observação está o conceito da velocidade da luz como limite inatingível para um objeto material, que não havia sido, até então, apresentado na sequência didática. É possível que Thales tivesse se valendo de informação por meio de espaços não formais ou de lembranças da abordagem do tema na 1ª série do Ensino Médio.

É possível, ainda, que esse modelo tenha emergido da interação com Osvaldo, visto que na quinta aula este aluno havia declarado que já tinha ouvido falar que a velocidade da luz era a maior que existia. Thales pode ter utilizado essa informação trazida por Osvaldo para formular o modelo segundo o qual o espelho não poderia chegar na velocidade da luz. Mesmo não tendo consciência plena das suas representações, Thales conseguiu utilizar invariantes operatórios para propor uma resposta coerente ao problema. Essa é uma das maneiras de se pode perceber o papel cumprido pelos CEA e TEA na abordagem e na resolução das situações.

O CEA de velocidade como a medida da rapidez de um deslocamento feito em relação a certo referencial conduziu o estudante ao reconhecimento dos dados relevantes para a resolução do problema do paradoxo do espelho. No caso, o fato de haver uma contradição que poderia negar a possibilidade do corpo ser acelerado indefinidamente, de acordo com a MC. O TEA que indica a velocidade da luz como um limite guiou a construção da explicação final. De fato, se a velocidade da luz não puder ser alcançada, o problema apresentado não terá sentido.

Mas, como esse corpo de conhecimento ainda está em desenvolvimento pelo estudante, Thales não percebeu que poderia utilizar a mesma proposição sobre o limite das velocidades para explicar o problema proposto pelo pesquisador na sexta aula. O problema consistia em determinar a velocidade, em relação ao chão, de uma pessoa que se deslocasse com velocidade V em relação a um raio de luz. Thales não se valeu do princípio que ele mesmo havia enunciado para o espelho. É compreensível que, neste momento, o estudante não tenha explorado as consequências do que havia acabado de enunciar.

Esse episódio reforça, ainda, a noção de que os conceitos não são entidades rígidas, constantes ou “colocadas” em algum lugar. Pelo contrário, são formulações mais sutis, que podem ser parcialmente compartilhadas entre grupos culturais, dentro dos quais é possível que os sujeitos façam apropriações de determinados aspectos mesmo sem que haja total consciência do ato. Também por isso, as formulações de Vergnaud acerca dos IO são um importante instrumento de análise.

Nas atividades escritas, Thales demonstra sua capacidade de abstração e de que maneira ele conseguiu compreender a relatividade do movimento.

Na primeira atividade, sobre o texto do Millor Fernandes, Thales afirma que

“O texto acima demonstra um ponto de vista sobre o movimento do Sol com relação à Terra e vice versa, ponto de vista que não é errado, mas também não é o único que está correto uma vez que há dois referenciais diferentes, sendo assim, se colocarmos o referencial no Sol a Terra está em movimento, por outro lado quando mudamos o referencial para a Terra, ideia defendida pelo autor no texto acima, o Sol é o corpo que se move. Isso significa que o movimento é relativo ao referencial.”

Essa explicação indica que Thales compreende bem a relatividade do movimento e utiliza de forma coerente essa formulação. O seu *schème* de movimento está ligado à identificação de um referencial. Nesse caso, o CEA de referencial como um sistema de referência cujo papel pode ser desempenhado por qualquer corpo é decisivo no entendimento de que há duas posições distintas – e válidas – para a afirmação de que a Terra gira em torno do Sol e que o Sol gira em torno da Terra. Em suma, os TEA que ligam esses conceitos são proposições como: “*todo movimento deve ser analisado a partir de um dado sistema de referência*” e “*não há referenciais privilegiados no estudo dos movimentos*”.

Do mesmo modo, a resposta fornecida à segunda atividade indica uma compreensão adequada da relatividade dos movimentos:

“De fato Garfield está em movimento junto com a Terra, levando o referencial ao Sol, por exemplo, mas como Jon está também em movimento com a Terra, Garfield permanece parado em relação ao Jon, ou seja, se Garfield está ou não parado depende do referencial.”

Os TEA que Thales utiliza estão muito próximos da formulação científica, o que lhe permite interpretar adequadamente todos os problemas que foram

apresentados sobre o campo conceitual da MC. Na forma de um algoritmo, esse TEA poderia ser explicitado como a expressão da soma de velocidades de Galileu⁹³.

Durante boa parte do debate ocorrido na quinta aula, Thales observou as formulações dos colegas, sem se pronunciar. Somente ao final da atividade, o estudante se posicionou, realizando uma síntese do que havia sido discutido. Nesse sentido, ele afirmou que a distinção entre o repouso e o movimento retilíneo uniforme era algo impossível porque, dentro de um sistema de referência inercial, não se tem informações suficientes para efetuar tal distinção. Para sustentar esse argumento, Thales se valeu de uma analogia com uma pessoa que é colocada em uma caverna, sem qualquer relógio e, por isso, perde a noção da passagem dos dias.

Ao ser apresentado ao paradoxo do espelho, Thales, como já indicado anteriormente, continua com a utilização dos TEA já citados, mas com a inclusão de uma condição limitante para a análise dos movimentos. Mesmo assim, é notável que Thales não tenha, nesse novo e paradoxal contexto, abandonado a ideia do movimento relativo.

Esse fato se mostra evidente na atividade 4, na primeira pergunta (sobre a velocidade relativa entre duas pessoas), onde Thales utiliza o algoritmo de Galileu e determina as velocidades entre os personagens (Einstein e Mileva) quando há movimento relativo entre eles.

O fato é que o TEA passou a ser mais amplo, admitindo o fato de que há uma exceção na regra geral que é a velocidade da luz, como invariante e limite superior de velocidades. Ou seja, é possível que o estudante admita o caráter absoluto da velocidade da luz porque faz sentido para ele o fato de que a indistinguibilidade entre o repouso e o movimento retilíneo uniforme pode ser preservada, se admitirmos que a velocidade da luz é absoluta. Outra forma de analisar essa situação é afirmar que há duas linhas de pensamento distintas, mas que são utilizadas simultaneamente. Nesse sentido, Thales admitiria o valor limitante para a velocidade da luz e a indistinguibilidade entre o repouso e o MRU. A maneira como Thales propôs a solução para o paradoxo do espelho é um indício de que a primeira interpretação é mais coerente.

⁹³ $V = v_a - v_b$, onde V é a velocidade relativa entre dois corpos a e b ; v_a e v_b são as velocidades do referencial e do objeto em relação a outro referencial (que, quase sempre, é a Terra).

Por isso, o TEA que percebemos é algo como “*Todo movimento é relativo a um dado referencial à exceção da luz que possui um caráter absoluto, sendo, portanto o valor limite para velocidades*”.

É possível representar esse TEA por

$$V \left\{ \begin{array}{l} = v_a - v_b \rightarrow \text{se } v_a \neq c \text{ e } v_b \neq c \\ = c \rightarrow \text{se } v_a = c \text{ ou } v_b = c \\ = c \rightarrow \text{se } v_a - v_b > c \end{array} \right.$$

Isso se torna evidente quando, no problema sobre a velocidade relativa entre uma pessoa e sua imagem, na quarta atividade, Thales afirma que a velocidade da imagem em relação ao objeto não poderia ser o dobro da velocidade do objeto em relação ao solo (que, no caso da questão, daria 1,6c).

O estudante indica que a velocidade relativa deveria ser 1,0c que, mesmo sendo um resultado equivocados, é coerente com o TEA apresentado. Thales não conhecia a soma de velocidades de Einstein⁹⁴ e interpretou que, como havia uma velocidade limite, todo resultado que suplantasse a velocidade da luz no vácuo, teria seu valor reduzido a c. O que conduziu essa análise nos parece ter sido o fato de que a imagem é produzida a partir de luz. Além disso, o estudante explica que o resultado não é estranho porque a velocidade da luz é absoluta.

O *schème* de movimento, portanto, sofreu um alargamento em suas possibilidades de ação. Ao funcionar de forma solidária com o *schème* de tempo, o de movimento permitirá que Thales tenha sucesso na abordagem de situações cada vez mais complexas e saiba diferenciar os campos de validade de cada modelo teórico.

A atividade 6 serviu para confirmar essa análise sobre o TEA utilizado por Thales. Para explicar o motivo de os robôs enviados a Marte serem autômatos, ele faz menção à dilatação do tempo (o que não é correto), mas seu texto indica que “*as coordenadas dadas por cientistas na Terra levaria um tempo para chegar em Marte*”, o que demonstra a utilização do valor limite (mas não infinito) da velocidade da luz.

⁹⁴ Einstein deduziu que o módulo da velocidade relativa (V) entre dois objetos que possuem velocidades em módulo iguais a v_a e v_b deveria ser $V = \frac{v_a - v_b}{1 - \frac{v_a \cdot v_b}{c^2}}$.

Ainda nessa atividade, Thales aborda a segunda questão a partir da dilatação temporal e afirma que se a velocidade da nave fosse muito grande, a dilatação temporal também deveria ser e, com isso, uma pessoa na Terra poderia chegar em um planeta a 10 000 anos-luz de distância. Para chegar a essa conclusão, foi respeitado o caráter limitador da velocidade da luz pois o estudante utilizou a dilatação do tempo e não a necessidade de uma velocidade muito alta como base da explicação.

Essa adesão ao modelo da TRR também pode ser verificado na resposta à terceira questão, quando Thales interpreta o quadro de Salvador Dali dizendo que ele *“apresenta uma cena onde o tempo parece passar lentamente, o que, na Relatividade Restrita, dependendo de referencial acontece com o tempo, quando se leva em consideração a dilatação temporal.”*

Também no caso do tempo de vida do múon, a explicação dada reforça a utilização do modelo relativístico, visto que ele explica que a partícula subatômica chega à superfície da Terra *“Por sua velocidade [ser] alta a dilatação temporal é grande, dando então ao múon mais tempo de vida, já que o tempo dela vai passar mais devagar com relação ao nosso.”*

O aprendizado da MC não se configurou como um obstáculo ao aprendizado da TRR para Thales porque ele conseguiu reconhecer as limitações e utilizou bem as novidades. É de se notar que ele conseguiu ampliar as possibilidades de ação de seus IO sem colocar em confronto as representações sobre a natureza dos movimentos construída no campo conceitual da MC e expandida para o da TRR. Esse fato permitiu a ele a construção de um TEA abrangente o suficiente para interpretar fenômenos relativísticos ou não.

Podemos, assim, concluir que a sequência de atividades proposta, com a confrontação entre os modelos clássico e relativístico, foi para esse estudante um campo frutífero de construção de sentidos. Ao que parece, tais construções foram favorecidas pelo fato de que Thales conseguiu utilizar bem a noção de relatividade do movimento. O CEA de referencial permitiu a ele abordar as situações a partir de diversos pontos de vista.

A conclusão interessante dessa trajetória cognitiva é que ela se diferencia dos estudantes analisados até então porque seu *schème* de movimento não se diferenciou em dois sub-*schèmes*, cada um deles associado às situações que exigiam níveis diferenciados de abstração. Pelo contrário, Thales demonstrou uma

ampliação da abrangência de seu *schème*, verificado pela maior generalidade de seus IO, que abarcaram as condições impostas pela TRR.

A análise das produções desse estudante não revelam que ele acessava diferentes formas de organização das atividades em função de maior ou menor conhecimento das situações propostas. Pelo contrário, foi possível perceber, ao longo de toda a sequência didática, uma coerência nas operações desenvolvidas pelo estudante e um aumento nas suas capacidades explicativas.

4.5) Osvaldo

Osvaldo sempre apresentou, desde o início dos trabalhos, uma compreensão muito boa dos campos conceituais estudados. A trajetória escolar do estudante é marcada por um interesse precoce sobre assuntos ligados às ciências da natureza. Desde muito cedo ele já se interessava por assuntos ligados à Física e à Astronomia, segundo informação fornecida pelo próprio estudante em conversa informal. Sua opção, ao final do terceiro ano, foi cursar Bacharelado em Física na Universidade Federal de Viçosa.

Durante a quinta aula, Osvaldo, assim como Thales, demonstrou uma boa compreensão sobre a validade dos modelos científicos. Nesse contexto, ele disse ser possível que uma nova teoria seja construída com base em situações ainda desconhecidas e que faça com que o que sabemos hoje seja um caso particular.

As participações de Osvaldo nas discussões eram quase sempre decisivas e os colegas reconheciam nele uma “autoridade” para realizar afirmações sobre conceitos físicos. Talvez isso se deva ao conhecimento de sua trajetória escolar, ou ainda à clareza e profundidade com que enunciava suas posições.

Esse fato é mostrado durante o debate que ocorreu entre os alunos, o professor e o pesquisador na quinta aula. Ao serem questionados sobre a possibilidade ou não de um experimento distinguir o repouso do movimento retilíneo uniforme, Antônio dizia que seria possível essa distinção utilizando referenciais em situações distintas (no caso da discussão, dentro e fora de um ônibus). A intervenção de Osvaldo foi decisiva, comparando o caso apresentado com a Terra em movimento em relação ao Sol. Em que pese o fato de sabermos que a trajetória não é retilínea e nem o movimento é uniforme, as variações são muito sutis em curtos intervalos de tempo, o que nos permite admitir que o movimento da Terra

pode ser considerado, em uma primeira aproximação, como retilíneo e uniforme. Nesse cenário, se um objeto for lançado verticalmente para cima, volta às mãos de quem arremessou. Para Osvaldo, se Antônio estivesse certo, o objeto não cairia dessa forma. Prontamente, esse argumento foi admitido como válido por toda a classe – inclusive o próprio Antônio.

É de se ressaltar que a fala de Osvaldo, nesse caso, fechou uma linha de raciocínio que vários outros estudantes tinham começado (Cassiano, Lara e Thales). Nesse sentido, ele conseguiu dar uma forma final às formulações que estavam sendo construídas em conjunto. Seus conhecimentos em ação lhe permitiram, entre outras coisas, extrair das falas dos colegas o que havia de comum e construir uma síntese das representações que estavam sendo construídas pelo grupo.

Desde a primeira atividade de sala, Osvaldo demonstrou uma boa articulação de ideias, apesar de ainda possuir uma concepção da relatividade do movimento como uma “impressão”. Sobre o texto de Millor Fernandes, Osvaldo afirma que

“Cientificamente é comprovado que é a Terra que gira em torno do Sol e não o contrário. Entretanto, os nossos sentidos revelam o oposto, ou seja, que a Terra está parada e é o Sol que se move ao redor dela. O fato é que não se pode dizer que uma ou outra afirmação está errada. É preciso levar em consideração qual o referencial para se fazer uma das duas afirmações. Por exemplo, de um ponto de referência sobre a Terra um indivíduo verá o Sol se mover, enquanto ele está parado. Já se tomar um ponto de referência sobre o Sol, um indivíduo verá que a Terra que está se movendo, enquanto o Sol está parado. Por isso é necessário ter um certo cuidado ao se afirmar algo. É preciso, na afirmação, mostrar qual o referencial de que se está falando.”

A ambiguidade que existe no texto (iniciar afirmando que o movimento é absoluto para, em seguida dizer que ele é relativo) é uma possível indicação de um conhecimento que está em construção, sem ainda total articulação e sistematização. Isso faz com que ainda não haja um compromisso epistemológico com tudo o que é dito pelo estudante.

Ainda sobre essa situação, na segunda atividade de sala, sobre a discussão entre o Garfield e seu dono, Osvaldo afirma que a atitude do gato está correta pois

“se tomarmos como referência o Sol, um indivíduo localizado neste local verá a Terra se mover ao seu redor. Como Garfield está na Terra, ele está se movendo em relação ao Sol, estando portanto corretos uma vez que Jon não especificou a fonte de referência.”

Para a abordagem e resolução dessas situações, Osvaldo utiliza o *schème* de movimento, o qual utiliza o CEA de referencial como a fonte para a organização de um TEA muito parecido com aquele utilizado por Thales. Há, no entanto, uma pequena diferença entre o estatuto epistemológico do CEA de referencial para os dois estudantes, pelo menos no que se refere ao início das atividades. Parece que, para Osvaldo, a relatividade do movimento é aceita, mas há uma concepção de fundo de que há um movimento cientificamente provado e alguns outros que existem mais do ponto de vista do senso comum.

Por exemplo, na fala de Osvaldo durante a quinta aula pode-se perceber que quando a velocidade é dada em relação à Terra, ele não cita o referencial: “*mas esses dois não percebem porque estão com a mesma velocidade. Mesma coisa com a Terra, então. Se você jogar um giz pro alto, você vai pegar o giz normal. Mas, o que ... a Terra não está em movimento a mesma coisa?*”

O grupo a que pertenciam Osvaldo e Thales manteve intensa interação no decorrer da terceira atividade. Essa troca foi decisiva para que eles conseguissem construir o modelo explicativo que impedia o espelho de chegar à velocidade da luz.

Quando o estudante tomou contato formal com os postulados da TRR, foi possível perceber uma alteração no TEA acima indicado, de forma a incorporar um novo campo de validade. Assim, para Osvaldo, “*o movimento é relativo a um dado referencial, com exceção à velocidade da luz, que é absoluta.*” Mais uma vez, como aconteceu com Thales, é possível perceber um alargamento nas possibilidades de ação do *schème* de movimento, em um processo de assimilação recíproca com o de tempo.

Na quarta atividade de sala, quando precisa encontrar a velocidade relativa, Osvaldo reconhece que o modelo clássico é inoperante para abordar situações em que a velocidade relativa atinja valores superiores à da luz no vácuo. Quando isso ocorrer, Osvaldo admite que não é possível suplantá-la ou igualá-la.

A formulação desse TEA pode ser indicada como

$$V \left\{ \begin{array}{l} = v_a - v_b \rightarrow \text{se } v_a \neq c \text{ e } v_b \neq c \\ = c \rightarrow \text{se } v_a = c \text{ ou } v_b = c \\ < c \rightarrow \text{se } v_a - v_b > c \end{array} \right.$$

Para que esse TEA faça sentido, é necessário que novas concepções sobre os intervalos de tempo e para o espaço sejam construídas. Para isso, o estudante deve incorporar, ao *schème* de tempo, o *schème* de movimento e, com isso, estabelecer TEA ligados à relatividade do movimento.

Na resolução da atividade 6 de sala de aula, Osvaldo não faz menção à dilatação do tempo como explicação para o fato de os robôs enviados a Marte serem autômatos. Para ele, isso deve ao

“fato de que há um descompasso de tempo entre a Terra e Marte, sendo preciso portanto que o próprio robô possa tomar a decisão do que fazer, caso contrário a diferença de tempo poderia implicar na perda do mesmo devido uma dificuldade que ele encontrasse e não chegasse resposta a tempo para tomar uma decisão.”

Apesar desses progressos, é importante destacar a não utilização da dilatação temporal na segunda questão, que perguntava se seria possível um recém-nascido chegar com vida a um planeta muito distante. Os CEA utilizados foram o de intervalo de tempo absoluto e de velocidade absoluta da luz. Por isso, o estudante afirmou que um viajante não poderia chegar vivo em um planeta a 10 000 anos-luz de distância da Terra.

“pois supondo que ela viajasse a velocidade da luz, que é a máxima velocidade, ela ainda demoraria 10 000 anos para chegar a esse planeta, o que impediria que esta chegasse com vida, visto que o tempo de vida do ser humano, em casos extremos, poderá chegar a cerca de 100 anos.”

Apesar de utilizar a ideia da velocidade absoluta da luz, Osvaldo lançou mão de um cálculo baseado na ideia de tempo absoluto. É de se notar, nesse caso, certa fusão entre os princípios da MC e da TRR, que é um indício de que está ocorrendo um processo de conceitualização, mas que este ainda não está completo. Dessa forma, a escolha dos conceitos e das leis válidos em cada problema ainda não está totalmente sedimentada.

Isso ocorre porque o *schème* inicial de movimento comportava dois sub-*schèmes* que podiam entrar em jogo em diferentes situações. Um deles organizava a ação a partir do estabelecimento de um referencial tido como verdadeiro. O outro, a partir da possibilidade de escolha de qualquer referencial. Quando da assimilação recíproca com o *schème* de tempo, essas características continuaram a existir no

novo sistema, sendo o sub-*schème* associado à relatividade do movimento mais acessado.

No entanto, essa característica não é tão forte como a que verificamos para Lara, por exemplo, no que diz respeito à tendência de tornar absoluta a relatividade do tempo. Parece-me que, no caso de Osvaldo, essa representação opera de forma bem mais sutil e não é um obstáculo muito significativo no enfrentamento das situações de aprendizagem.

Essa posição pode ser verificada quando analisamos as respostas dadas por ele ao longo da oitava aula. Quando o pesquisador questiona a turma sobre a realidade ou não da dilatação do tempo, Osvaldo responde

“Eu acho que acontece a dilatação, sim. Mas, quando a gente fala de dilatação, a gente lembra o conceito que a gente tem de espaço, igual uma barra de ferro ao dilatar, aumenta o tamanho. A gente tem essa percepção. Aí, a gente pensa: bom, o tempo aumentando de tamanho é uma coisa meio abstrata e a gente não consegue entender direito. Mas, eu acho que o fato da dilatação do tempo ... é um aumento do tempo ... é o tempo que tá aumentando em relação aos outros.”

Para fazer a análise do quadro de Salvador Dalí, o estudante utiliza o conceito de tempo relativo e afirma que *“A obra de Salvador Dali faz alusão a relatividade do tempo, procurando mostrar, através da deformação dos relógios pintados a dilatação do tempo.”*

O CEA de relatividade é, também, o que conduz ao reconhecimento do problema mostrado na atividade final, sobre o intervalo de tempo de vida do múon. Ao explicar as condições de detecção da partícula na superfície da Terra sem que essa ultrapasse a velocidade da luz, Osvaldo se vale da noção de tempo relativo :

“Provavelmente, por tal acontecimento, houve uma dilatação no tempo, em que o tempo na superfície terrestre passou mais rápido que o tempo na trajetória do múon. Medido da Terra, a vida do múon seria de 2×10^{-6} s, porém tomando o próprio múon como referencial e sua trajetória, o período de tempo decorrido foi maior, a ponto de diminuir a velocidade desta ($V \propto 1/\Delta t$), tornando-a menor que a velocidade da luz. Por isso, se medir o tempo com o referencial no múon, muito provavelmente seu período de vida seria maior.”

O cuidado revelado na explicitação dos referenciais para a medida do tempo revela uma boa apropriação do campo conceitual da TRR. Ao ser questionado pelo pesquisador sobre o motivo da utilização da palavra “provavelmente”, o estudante

revelou que *“Eu não sabia se era isso ... tipo ... a resposta certa. Mas, foi o que eu pensei.”*

O TEA utilizado segue a mesma lógica anterior, somente com o acréscimo de que o cálculo da velocidade deve ser feito com o tempo dilatado. Assim, ao explicitar em sua resposta que a velocidade do múon seria menor que a da luz porque o tempo foi dilatado, Osvaldo revelou que (1) essa questão está associada ao caráter relativo do movimento e (2) não há um referencial privilegiado para o estudo dos movimentos.

CONCLUSÃO

1) Introdução

A partir desse momento, passo a apresentar e discutir as principais conclusões deste trabalho, indicando os pontos mais significativos, tanto do ponto de vista dos achados quanto das questões ainda em aberto. Para fazer isso, torna-se, então, necessária a volta às questões de pesquisa, às hipóteses que foram assumidas, ao processo da pesquisa em si e à forma como os dados foram construídos e analisados.

Nesse sentido, as conclusões desta tese se desdobram em três seções. A primeira tratará das questões ligadas ao que esta pesquisa conseguiu revelar em termos da abordagem didática, da apropriação do referencial teórico como base para análise dos dados, da metodologia de pesquisa e dos principais achados teóricos e práticos. A segunda seção será dedicada à discussão dos pontos que ficaram em aberto, seja por limitações inerentes à necessidade de produzirem recortes no objeto de pesquisa, seja por conduções inadequadas ligadas à própria dinâmica do ambiente escolar, seja pelo direcionamento dos interesses pessoais na pesquisa. Por fim, na terceira seção, faremos uma avaliação geral, resumindo o principais pontos que esta pesquisa suscitou.

2) Achados da pesquisa

2.1) Questões didáticas

O primeiro ponto importante a discutir diz respeito às motivações iniciais para a execução dessa pesquisa. A escolha dos referenciais teóricos e da forma como as análises foram feitas revela que a base desta pesquisa é a Psicologia Cognitiva, se apoiando em situações didáticas. Apesar disso, a inspiração inicial para a proposição das questões de pesquisa estava ligada à didática das ciências. O questionamento original da pesquisa revela, em parte, essa filiação didática e pode ser traduzido para o cenário escolar da seguinte forma: *“quais as condições devem ser satisfeitas para que os estudantes se apropriem dos construtos da TRR?”*

No entanto, não procurei fazer um tipo de manual de didática, sugerindo quais seriam os passos para um bom ensino da TRR. Não me parece que tal empreitada seja viável, visto que as realidades das salas de aula são muito díspares e

comportam diversos atores, cada qual com suas motivações e necessidades. A orientação desta pesquisa procurou revelar as formas de significação sobre a noção de tempo relativo e, com isso, se aproxima também da psicologia cognitiva, talvez até mais do que da didática. A utilização dos elementos aqui problematizados para a dinâmica do processo ensino-aprendizagem não é, portanto, direta. Pelo contrário, necessita de adaptações para cada projeto educativo, em cada realidade específica.

Nesse sentido, acredito que as sinalizações didáticas possam ser centradas em três pontos centrais: a possibilidade de ensinar a TRR no ensino médio, as condições para que haja uma aprendizagem significativa e a organização dos materiais de ensino.

À primeira questão, ligada à possibilidade de se ensinar a TRR no ensino médio, é possível apresentar uma resposta positiva. É certo que há obstáculos comuns ao aprendizado da MC e da TRR, ligados à relatividade do movimento. Alguns estudantes que não obtiveram sucesso no aprendizado da TRR já apresentavam dificuldades de utilização dos conceitos clássicos. A diversidade de situações pode contribuir para que esses estudantes consigam ampliar o *schème* de movimento e utilizá-lo nos dois campos conceituais.

Portanto, pode haver um mútuo favorecimento entre esses dois campos conceituais se eles não forem separados por grandes intervalos de tempo pedagógico. A aproximação desses dois campos conceituais pode favorecer o aprendizado ao fornecer mais contextos para dar significado aos conceitos estudados.

Em princípio, esses novos contextos poderiam contribuir para que ocorresse a assimilação recíproca entre os *schèmes* de movimento e tempo e, com isso, construir um sistema de relações mais complexos para os fenômenos envolvidos em cada campo conceitual. A interpretação de nossos dados indica ser possível a ocorrência dessa assimilação.

Nesse sentido, a possibilidade de aprender os fundamentos da TRR se dá em função da compreensão de um sistema de conhecimentos que não pode ser verificado pelas experiências mais imediatas da vida comum, como também é verdade para grande parte do que é ensinado em MC. Assim, aprender os fundamentos da TRR exige um processo de forte abstração, já que a construção de um modelo teórico consistente nessa área, por parte do aprendiz, se faz a partir de considerações lógicas decorrentes da adoção dos postulados.

Estudantes que estejam no ensino médio, a princípio, teriam condições de realizar tal tarefa de abstração e reconhecer, nos modelos da TRR, uma lógica própria de relação entre as noções de tempo, espaço e velocidade. Foi o que aconteceu, por exemplo, com Osvaldo e Thales ao longo da pesquisa. Esses estudantes se mostraram capazes de realizar tais operações lógicas e expandir seus modelos explicativos para os fenômenos relativísticos.

No entanto, nem todos os alunos conseguiram completar tal construção, o que conduz à discussão do segundo ponto – as condições para a aprendizagem. Nesse caso, o aprendizado da MC como campo conceitual não parece ter sido determinante para que os estudantes se apropriassem da TRR. Tampouco pode-se dizer, pelos dados apresentados nesta pesquisa, que a MC seja um obstáculo à TRR.

O que me parece ser essencial é que a noção de tempo relativo necessita de uma compreensão da relatividade do movimento. A aparente tautologia dessa afirmação exige uma discussão mais ampla. A noção de tempo começa a se tornar operacional quando coordenada com a de velocidade. Nesse processo, o sistema de significação próprio da MC admite, mesmo que forma subjacente, que o tempo seja concebido como uma grandeza absoluta relacionada, apenas, à duração dos eventos analisados (os deslocamentos, por exemplo) e independente do sistema de referência utilizado.

Por isso, os *schèmes* de movimento e de tempo são acionados para lidar com situações ligadas à relatividade galileana, partilhando o conceito de velocidade, mas sem a necessidade de uma assimilação recíproca entre eles. Isso porque há uma assimetria entre os IO ligados a cada um desses *schèmes*: o de movimento necessita de trabalhar com noções relativas e o de tempo, com noções absolutas.

A novidade apresentada pela TRR que investigamos nesta pesquisa é a da ampliação dessa natureza relativa para o tempo. Dessa forma, para dar conta das situações ligadas à comparação entre as durações dos eventos, o sujeito precisa proceder a assimilação recíproca entre os *schèmes* de tempo e de movimento.

Alguns dos estudantes, como, por exemplo, Nayara, não conseguiram operar com os modelos da TRR, em grande parte, porque não tinham bem desenvolvido o *schème* de movimento e tratavam todos os movimentos como absolutos. Nesse sentido, o caso de Lara é interessante porque ela não se negou a trabalhar com a noção de tempo relativo, mas seu *schème* de movimento organiza a ação a partir do

estabelecimento de um referencial privilegiado para, a partir dele, analisar os deslocamentos e as velocidades. Logo, a característica não totalmente relativa do movimento, revelada pela estudante, também pode ser verificada quando do tratamento do tempo.

No entanto, não basta ter o *schème* de movimento bem desenvolvido para que seja possível o aprendizado em TRR. Cassiano, por exemplo, revelou uma boa utilização dos modelos clássicos. No entanto, o estudante não desenvolveu bem os modelos relativísticos.

Essas considerações nos permitem afirmar que há uma mútua implicação entre os aprendizados da MC e da TRR. A escolha didática de organização temporal dos conteúdos a serem ensinados que fizemos privilegiou uma narrativa que partia do estudo dos movimentos dentro do campo conceitual da MC para, em seguida, apresentar os fenômenos da TRR. Essa escolha não só forneceu o contexto das situações a serem enfrentadas pelos estudantes como contribuiu para a identificação da diferença epistemológica entre os dois campos conceituais.

Há, ainda, a questão sobre a possibilidade de ser a MC um obstáculo ao aprendizado da TRR. Nesse caso, o exemplo de Cassiano pode ser utilizado, por que parece que ele não tenha sido atingido pelas discussões sobre a TRR. Na primeira parte das intervenções, quando o campo conceitual estudado era o da MC, o estudante revelou um bom nível de entendimento sobre a natureza relativa do movimento. No entanto, a partir do momento em que se começou a efetuar a transição para a TRR, Cassiano não aderiu ao modelo e continuou a resolver os problemas com os mesmos IO de antes. Nesse caso, ele parece não ter sido desestabilizado pela problemática apresentada pelo professor, tampouco reconheceu na TRR um modelo passível de ser utilizado para resolver as situações propostas.

Dessa forma, é possível chegar ao terceiro ponto desta subseção, que diz respeito à organização do ensino desse campo conceitual. Em primeiro lugar, nos parece que há uma decisão didática importante a ser tomada. A TRR pode ser apresentada a partir da análise das inconsistências entre a MC e o Eletromagnetismo, mostrando a necessidade de um sistema de relações mais abrangente. Mas, para que essa estratégia tenha sucesso, é necessário que os estudantes tenham desenvolvido o *schème* de movimento, com a utilização de IO ligados à relatividade do movimento.

Esse tipo de metodologia de ensino da Física Moderna, a partir da exploração de pontos de tensão da Física Clássica tem sido relatado na literatura e pode ser eficaz no sentido de se criar desequilíbrios e de mostrar o caráter transitório do conhecimento científico. Essa estratégia se revelou boa com alguns estudantes, como, por exemplo, Thales, Osvaldo e Lara. Eles, em níveis diferentes, se revelaram capazes de compreender a crise dos modelos clássicos e de como a nova teoria conseguiu superar tal crise. Como já indicado, a diferença nas trajetórias dos estudantes citados deveu-se, em grande parte, à forma como o *schème* de movimento influenciou no de tempo ao longo do processo.

A questão colocada a essa metodologia pode ser discutida a partir da consideração de três grupos diferentes de estudantes. Ela só é eficaz se os estudantes já estiverem, de certa forma, familiarizados, pelo menos, com alguns fundamentos de base da MC como a relatividade do movimento e a indistinguibilidade das leis mecânicas dentro de referenciais inerciais. Alunos como Nayara, por exemplo, não foram desestabilizados porque não percebem os pontos onde ocorreu, de fato, a tensão conceitual na virada do século XIX para o XX. No caso dessa estudante, ela sequer utilizava, de maneira satisfatória, os conceitos ligados à MC. Outros alunos, como Cassiano, por creditarem aos modelos clássicos uma verdade absoluta também não perceberam a necessidade de uma reformulação nos modelos explicativos.

A análise dos dados das participações desses três grupos de estudantes nos permite inferir, portanto, que a organização do ensino da MC e da TRR em sequência é aconselhável, mostrando que há campos de validade para que se possam (ou devam) aplicar cada um dos modelos. Há obstáculos ao aprendizado que são comuns aos dois campos conceituais como, por exemplo, uma análise mais egocêntrica do movimento e/ou a atribuição de um referencial absoluto ao movimento. Esses obstáculos podem ser superados quando os dois campos conceituais são colocados em perspectiva e mais situações devem ser dominadas pelos estudantes. Nesse sentido, uma maior variedade de situações pode contribuir não só para uma melhoria na utilização do *schème* de tempo no âmbito da TRR, mas no aumento da abrangência do *schème* de movimento, abarcando mais aspectos ligados à relatividade.

Não defendemos aqui que somente o aumento da quantidade de situações propostas aos estudantes faça com que estes aprendam mais. Mas, essa discussão

diz respeito ao fato de que há, nos *schèmes*, regras de ação e de tomada de informação que necessitam serem aplicadas em um grande número de situações, em um movimento chamado por Piaget de assimilação generalizante pois, dessa forma, o estudante poderá aprender a discernir com maior exatidão cada um dos campos de validade dos conceitos utilizados em ação. Esse é um importante papel que cumpre o planejamento didático, ou seja, o de antecipar por quais caminhos será possível apresentar uma narrativa do ensino que possibilite aos estudantes trilhar uma rota de significações.

Defendemos, portanto, a partir dos dados apresentados nesta pesquisa, a tese de que o trabalho em paralelo dos dois campos conceituais fornece melhores elementos para que os estudantes possam desenvolver IO e tomar consciência dos domínios de validade de cada formulação teórica. Essa posição revela-se particularmente importante na medida em que as situações nas quais o sujeito deve lançar mão do conceito de referencial podem fornecer contextos para a discussão da relatividade do movimento e do tempo, analisando os limites de validade dos campos conceituais estudados.

2.2) Utilização da TCC como quadro de referência

A TCC é uma teoria multifacetada. Seu criador tem raízes muito fortes ligadas à tradição piagetiana, o que é visível em diversas formulações, das quais creio que a noção de *schème* seja a mais forte. Mas o desenvolvimento da teoria não é uma simples extensão das teses de Piaget, visto que Vergnaud dialoga com formulações ligadas à “psicologia soviética”⁹⁵, sobretudo no que refere às representações simbólicas e o conceito de zona de desenvolvimento proximal.

A formação em psicologia do autor da TCC lhe permitiu estabelecer uma ligação entre o domínio da ação do sujeito frente às situações e o seu interesse em investigar a aprendizagem específica de alguns campos da matemática. Esse fato fez com que a TCC tivesse uma dupla possibilidade de aplicação, seja como uma teoria psicológica, seja como teoria didática.

A proposta do desenvolvimento teórico desta tese foi a de se fazer uma leitura dos pontos mais significativos da TCC para o Ensino de Ciências. Assim, foi preciso posicionar a teoria dentro de um quadro de significação distinto daquele

⁹⁵ O próprio Vergnaud é membro da academia russa de psicologia.

originalmente proposto, com a conseqüente reinterpretação de alguns de seus conceitos chave. Creio que os dois pontos mais emblemáticos são a noção de *schème* e de conceito.

Em primeiro lugar, a formulação original de Vergnaud para *schème* coloca essa noção como o elemento chave para o funcionamento cognitivo do sujeito, o que foi assumido como essencial para o desenvolvimento cognitivo em geral e para o aprendizado de conceitos científicos. A dimensão organizadora da ação inerente ao *schème* é o que pode permitir a um sujeito reconhecer uma situação como sendo algo possível de ser dominada, extrair informações tidas como pertinentes e gerar relações entre elas.

Em segundo lugar, a concepção dos conceitos como algo profundamente ligado às situações, onde ele ganha materialidade e, por isso, funcionalidade. O processo de conceitualização é ligado, nesse contexto, a uma progressiva modificação dos IO frente às situações enfrentadas pelos sujeitos. Isso confere uma característica pessoal e não linear ao processo de construção de conceitos. Logo, os IO utilizados pelos estudantes nesse processo de aprendizagem são como “ensaios” de compreensão do real e o desenvolvimento cognitivo é visto como um processo de aprimoramento e diferenciação de *schèmes*.

Sobre esses dois aspectos importantes da TCC, há, ainda, alguns pontos a esclarecer, ligado às diferenças de abordagens entre a proposição original de Vergnaud e o modelo aplicado nesta pesquisa.

A proposição original de Vergnaud é a de que as situações incitam no sujeito a utilização de determinado *schème* e que este organiza a atividade, lançando mão de conceitos e de proposições feitas sobre o real. Nesse sentido, a influência da cultura sobre as atividades escolares de intervenção didática pode ser mais facilmente percebida pela atuação do professor, que escolhe as situações a serem propostas e, de certa forma, tenta transformar os conceitos historicamente construídos e validados pela ciência em algo “assimilável” pelos estudantes.

Percebe-se, nesse aspecto, que a utilização da TCC exige um esforço teórico no sentido de se identificar as filiações entre diversos *schèmes* em um processo histórico de utilização de inúmeros IO para determinadas classes de situações, investigando quais são as possíveis permanências e rupturas na forma de agir em situação. Esse foi o processo de identificação que Vergnaud realizou no estudo das estruturas aditivas e multiplicativas no âmbito da Matemática e que o permitiu

construir a teoria, como sintetiza o autor no livro “*A criança, a realidade e a matemática*” (VERGNAUD, 2009a).

A primeira modificação que introduzimos para a utilização da TCC no campo da Educação em Ciências foi a maior abertura aos aspectos culturais, representado pelo domínio mais ligado aos conceitos. Nesta apropriação, a ideia de que os *schèmes* estão na base do funcionamento cognitivo do sujeito continua sendo central, inclusive com a adoção da ideia de que os *schèmes* podem se coordenar em função de quais são as situações enfrentadas. Dessa forma, a interação *schème*-situação proposta por Vergnaud continua sendo importante e atual desde que seja entendida como uma manifestação de algo mais amplo, ligado à profunda interação entre cada sujeito e a cultura (incluindo a cultura científica e a cultura escolar).

Por mais que seja sabido e aceito que os sujeitos estão imersos na cultura e que esta não existe sem aqueles, creio ser essencial que se marquem os dois domínios – subjetivo e cultural – como polos de um contínuo. Afinal, o sujeito não é meramente um produto da cultura, o que poderia parecer uma espécie de behaviorismo cultural. Tampouco a cultura é o produto de um único sujeito, dado que ela é construída em um processo histórico e multifacetado. Logo, marcar esses dois pontos me parece essencial para a compreensão do sujeito em situação, durante a ocorrência do processo de conceitualização.

Mas, é evidente que esses dois domínios não possuem fronteiras delimitadas e se influenciam mutuamente. A inserção do sujeito no domínio cultural se faz por meio dos IO, que são os elementos responsáveis pela tomada de informação e pelo estabelecimento de relações e proposições. Dessa maneira, cada sujeito está em constante movimento de procura de construir significações sobre o que a ele é apresentado, seja em ambientes escolares ou não. Mesmo que, em determinado momento, esse sujeito não consiga elaborar proposições verdadeiras ou que necessite de testar proposições as mais variadas.

É o que foi possível perceber na trajetória de Nayara, que não parecia ter tido uma inserção significativa no domínio da Física como um todo. O fato de a estudante não conseguir reconhecer CEA pertinentes às ações revela que ela ainda não estava inserida no domínio cultural da Física, ou seja, Nayara não compartilhava das formas de pensar e de propor soluções tipicamente verificadas na ciência e, por

isso, não conseguia se valer de CEA pertinentes para a tomada de informações diante das situações propostas.

Quando o professor fazia perguntas diretas à estudante, esta procurava apresentar respostas aleatórias. Esse fato é um forte indicativo de que os *schèmes* utilizados pela estudante ainda não eram capazes de se valer de IO mais ou menos solidários aos que pertencem ao domínio conceitual utilizado pela Física. Ocorre, então, um processo que lembra em muito o exercício indiscriminado dos *schèmes*, procurando assimilar os objetos os mais variados para tentar produzir algum tipo de sentido.

Logo, parece-me que a trajetória de Nayara, que se revelou um tanto blindada às intervenções didáticas, não deva ser entendida como a incapacidade de conduzir um raciocínio lógico, por um desenvolvimento ainda lacunar dessa estrutura. Ao contrário, a estudante é capaz de construir uma explicação causal para o fato de “termos a impressão” de que é o Sol que se move, atribuindo ao maior corpo presente o papel de referencial “verdadeiro”.

Já Antônio, mesmo que, às vezes, construísse proposições falsas sobre as noções de movimento, ele já utilizava *schèmes* que guardavam maior similaridade com as formas de agir e de pensar da Ciência. Os CEA utilizados pelo estudante eram mais ancorados no âmbito científico, o que revela uma maior imersão nesse domínio.

Portanto, a unidade de análise proposta nesta tese, que une os aspectos subjetivos e culturais se revela interessante para dar conta dos aspectos ligados à ação. Cada uma das dimensões, se tomada isoladamente, não é suficiente para abarcar, sejam questões pessoais de significação, sejam as influências do entorno cultural que dão o contexto da ação dos sujeitos. Tomando essa unidade de análise como a referência da pesquisa, propus, então, a ideia de se investigar a evolução dos IO porque esta é a porta de entrada para os dois domínios.

Nos CEA e TEA é possível encontrar o nível atual do desenvolvimento – a partir da análise das atividades que o sujeito já demonstrou saber fazer –, o quão próximo determinado sujeito está dos modelos científicos que se quer ensinar e quais as possibilidades de novos aprendizados e desenvolvimentos – em se analisando as inferências e as ações em situações novas. Foi esse movimento que procurei fazer ao investigar os IO utilizados pelos estudantes para propor de que

maneira os *schèmes* de movimento e tempo se articularam no sentido de dar conta das novidades apresentadas pelo campo conceitual da TRR.

O meu foco de atenção estava mais voltado para os IO porque seria necessário analisar como eles poderiam evoluir e tal evolução seria, então, um forte indicativo da modificação nos *schèmes*. Mas, os outros componentes da unidade básica de análise proposta estiveram presentes, como é possível perceber quando da análise das trajetórias cognitivas dos estudantes.

Não encontrei na literatura pesquisada, tampouco nos momentos de discussão deste trabalho na Universidade de Paris 8 com o grupo de pesquisa de Vergnaud, uma formulação idêntica a que está aqui proposta. Dessa forma, acredito ser esta unidade de análise a contribuição teórica desta tese para o processo de pesquisa em ensino de ciências.

2.3) Metodologia de pesquisa

A questão da necessidade de investigação dos TEA e dos CEA permite que se faça uma ponte para a análise da metodologia utilizada na pesquisa. Para que fosse possível avaliar os IO utilizados pelos estudantes e indicar se eles eram capazes de transitar entre as formas predicativa e operatória do conhecimento foi preciso que se construíssem situações que suscitasse as duas formas de conhecimento. Além disso, era preciso lançar mão de situações que não fossem muito distantes dos interesses pedagógicos do professor. Assim, as situações propostas na pesquisa deveriam ser retiradas de problemas de cunho escolar, sob o risco de tornar os resultados encontrados muito distantes do que os estudantes fariam se não houvesse a pesquisa.

Desde o início das atividades, já havia demonstrado minha posição de que é impossível que qualquer atividade de pesquisa seja conduzida sem interferir na dinâmica escolar e que esse fato deve ser levado em consideração. No entanto, os cuidados que foram listados no capítulo 3, inclusive a maneira como as produções dos estudantes foram analisadas, minoraram essa situação inerente a qualquer pesquisa. Considero, então, acertada a metodologia de propor atividades semelhantes àquelas os estudantes poderiam ser motivados a resolver em intervenções didáticas comuns porque as características desta pesquisa assim o exigiram.

Além disso, a escolha da turma que já havia estudado a TRR me pareceu, também, acertada porque permitiu avaliar, mesmo que de forma secundária, o impacto – positivo ou negativo – que essa intervenção produziu. Nesse aspecto, é interessante perceber que, por exemplo, Thales e Osvaldo se valeram de um modelo relativístico sem saber identificar a origem do que haviam proposto e antes de o professor ter ensinado formalmente na sequência didática que acompanhamos nesta pesquisa.

Não há elementos para afirmar qual foi a influência do ensino da TRR na primeira série sobre a aprendizagem de cada estudante pesquisado porque esse não era o objetivo desta pesquisa. Tampouco procurei aplicar a metodologia de pesquisa em outras classes porque não se tratava de um estudo comparativo de abordagens didáticas.

O aparente pequeno número de estudantes pesquisados foi compensado com a grande heterogeneidade de trajetórias dos estudantes. Nesse sentido, creio que um maior número de estudantes não significaria uma maior quantidade de trajetórias distintas e, sim, mais estudantes cujas trajetórias poderiam ser alocadas como semelhantes às aquelas já identificadas. Dentro do próprio grupo de estudantes pesquisados, já houve, de certa forma, repetições de trajetórias cognitivas, razão pela qual optamos pela explicitação de cinco estudantes.

Esse é o motivo principal pelo qual considero que os dados construídos nesta pesquisa possuem validade e abrangência e, portanto, suportam as conclusões tiradas. Os estilos pessoais dos estudantes e a forma como eles utilizaram os *schèmes* ao longo das atividades propostas revelaram uma vasta gama de níveis de desenvolvimento cognitivo e de compreensão sobre os campos conceituais estudados. Logo, ao explicitar os IO comuns a boa parte dos estudantes da pesquisa, suas semelhanças e diferenças e as formas de ação dos *schèmes* de movimento e de tempo, creio que os dados aqui apresentados e analisados foram suficientes para atender aos propósitos desta pesquisa.

3) Questões para novas incursões

Como ocorre em toda pesquisa, há a necessidade em se efetuar recortes no objeto para que seja possível focar determinados aspectos em detrimento de outros. Assim, é inerente ao processo de realizar pesquisas qualitativas a existência de questões que se abrem a novas investigações.

Nesse sentido, a primeira questão que julgo estar ainda em aberto diz respeito à possibilidade da utilização da TCC em diversos outros domínios da Educação em Ciências. Os construtos aqui revelados ligados à evolução dos IO, apesar de se mostrarem eficazes para a análise do desenvolvimento dos sujeitos nesta pesquisa, ainda não foram utilizados em muitos outros campos conceituais. Dessa forma, a unidade de análise proposta ainda deve ser utilizada em outros domínios da ciência escolar no sentido de explorar suas potencialidades e seus limites, ao examinar os modos como estudantes agem em situações de aprendizagem escolar em ciências, bem como da análise da qualidade da aprendizagem que resulta desta ação. Somente com a diversificação de objetos de estudo e situações escolares (ambientes de ensino diversificados, contextos escolares diferenciados) é que o modelo de interpretação aqui apresentado poderá ganhar força e/ou ter sua possibilidade de ação delimitada.

Uma segunda questão que julgo ainda não ter sido totalmente respondida por essa pesquisa, por estar além dos objetivos traçados, diz respeito à influência que a assimilação recíproca entre os *schèmes* já citados de movimento e tempo no processo de compreensão de outras grandezas que mudam de estatuto epistemológico na transição entre a MC e a TRR, como, por exemplo, massa. A princípio, parece-me razoável dizer que o *schème* de movimento cumpre um papel importante nesses processos de consolidação da ideia de massa como função da velocidade, mas não foi feita qualquer incursão investigativa nesse sentido e, portanto, não é possível efetuar qualquer conclusão nesse sentido.

4) Considerações Finais

No fechamento dessa pesquisa, creio ser necessário sumarizar três pontos que acredito serem o que de mais relevante pude aprender em todo o processo.

A primeira importante parte desse balanço final, ligada ao referencial teórico, refere-se à possibilidade de síntese que a TCC oferece. Ao resgatar a análise funcional do desenvolvimento cognitivo em Piaget, Vergnaud abre a possibilidade de um mergulho nos processos pessoais de significação. Esse foi um caminho que, de acordo com a análise feita no capítulo 2, começou a ser trilhado por Piaget no final de sua obra, cuja potencialidade ainda não foi plenamente explorada no campo da psicologia cognitiva e, tampouco, da educação em ciências. Ao se apoiar nos construtos de Vigotski ligados à interação entre os sujeitos e à maneira como as

novidades aparecem no plano social, Vergnaud amplia as possibilidades de interpretação do funcionamento cognitivo, com a resignificação do conceito de invariante operatório.

De certa forma, ao construir um modelo que coloca os IO no centro das possibilidades de interação entre os planos pessoal e social, procurei evidenciar o que me parecia ser assumido por Vergnaud de forma subjacente: não se pode falar de atividade subjetiva sem se considerar a influência cultural, tampouco é possível considerar o conhecimento culturalmente produzido e validado sem que se considere a existência de sujeitos que conferem significações pessoais graças a processos de organização endógenos.

É nesse sentido que creio ser muito útil a ideia de que a Zona de Desenvolvimento Proximal não é única para um sujeito, mas dependente do campo conceitual e quais situações estão em consideração. Além disso, ela pode ser redefinida como a coordenação dos *schèmes* de um dado sujeito, uma vez que tal conjunto não revela apenas a história do que o sujeito já foi e é capaz de realizar, mas abre-se às possibilidades de novas adaptações desde que ocorram desequilíbrios satisfatoriamente conduzidos pelas atividades de ensino ou por outros sujeitos presentes.

Relativamente à pesquisa empírica, a conclusão maior é a de que o aprendizado da TRR insere-se em uma perspectiva mais ampla ligada à necessária coordenação (ou assimilação recíproca) de *schèmes* até então independentes. A diferença crucial de estatuto epistemológico entre a MC e a TRR, ligada ao que é absoluto e o que é relativo, exige uma reestruturação dos observáveis e a consequente incorporação, em um nível mais elevado, da influência do estabelecimento de um referencial sobre a velocidade, o espaço e o tempo.

O estudo da TRR provocou na maioria dos estudantes, exceto em Nayara e Cassiano, a assimilação recíproca entre os *schèmes* de movimento e de tempo. Entretanto, mesmo naqueles em que isso ocorreu, o nível de desenvolvimento do *schème* de movimento era distinto, o que significa dizer a maneira pela qual cada sujeito representou a noção de tempo relativo esteve em consonância com a própria noção de relatividade do movimento. É certo que houve evoluções, no sentido de que uma melhoria dessas noções em Osvaldo e Lara, e algumas permanências, como no caso de Thales (que apresentou a noção de movimento relativo desde a primeira atividade proposta).

Para os estudantes cujas trajetórias foram como a de Lara ou de Antônio, não se pode dizer que eles se deslocavam entre zonas de um perfil epistemológico de tempo. Esses alunos utilizaram uma forma de agir que buscava nas situações qual seria o melhor referencial (considerado como o verdadeiro) e, a partir daí, tentavam localizar os deslocamentos reais para, aí então, estabelecer os diferentes intervalos de tempo. Isso demonstra a existência de um *schème* que, se não revela apenas as características ligadas apenas à MC, também não compartilha totalmente os pressupostos da noção de tempo da TRR.

Dessa forma, qualquer atividade de intervenção sobre o tempo relativo não deve estar restrita às formulações específicas dessa noção, mas necessita ser colocada dentro de uma amplitude maior, na qual se relacionam diversos conceitos que dão sustentação às noções temporais.

Por meio desta pesquisa, tinha a intenção, dentre outros objetivos, de mostrar a pertinência e a relevância dos construtos de Vergnaud para a melhor compreensão da conceitualização em Física. Escolhi como objeto uma noção que sempre me acompanhou: o tempo. Trabalhei com estudantes adolescentes, que são minha maior experiência como professor. Gostaria que esses resultados, nascidos de uma pesquisa realizada na sala de aula, volte para ela. Com isso, pretendo que esta pesquisa possa ser, mais do que um produto, um processo. Tenho cada vez mais clareza que esse tem sido o objetivo de Vergnaud ao propor e desenvolver a TCC. A contribuição ora apresentada é, também, portanto, uma forma de homenagem à Gérard Vergnaud.

BIBLIOGRAFIA

- ABDALLA, M.C.B. *O Discreto Charme das Partículas Elementares*. São Paulo : Editora da Unesp. 2005.
- ALLCHIN, D. Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education*. v. 13, p. 179-195. 2004.
- ALVETTI, M. A. S. & DELIZOICOV, D. (1998), Ensino de física moderna e contemporânea e a Revista Ciência In: *Encontro de pesquisa em ensino de ciências*, 6, 1998, Florianópolis. Atas. Florianópolis: Imprensa UFSC.
- ARRIASSECQ, I. e GRECA, I. M. Introducción de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio/polimodal de enseñanza: identificación de teoremas-en-acto y determinación de objetivos-obstáculo. *Investigações em Ensino de Ciências*. V.11(2). Pp. 189-218. 2006.
- ARRIASSECQ, I e GRECA, I. M. A teaching-learning sequence for the Special Relativity Theory at High School level historically and epistemologically contextualized. *Science & Education*. N. 21. 2012. Pp. 827 – 851.
- ARRUDA S. M. e FILHO, D. O. T. Laboratório Caseiro de Física Moderna. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, edição especial: p. 390-394, nov.2004.
- AYALA FILHO, A. L. A construção de um perfil para o conceito de referencial em Física e os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da teoria da relatividade restrita. *Investigações em Ensino de Ciências*. V. 15(1), pp. 155-179, 2010
- BALIBAR, F. *Einstein: uma leitura de Galileu e Newton*. Lisboa: Edições 70. 1988.
- BALIBAR, F. L'espace-temps de la relativité. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p.73 – 78.
- BARREAU, H. Les dix invariants culturels de la représentation du temps. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p.193 – 208.
- BEN DOV, Y. *Convite à Física*. Rio de Janeiro : Jorge Zahar Editor. 1996.
- BIPM. *Unité de temps* << http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/chapter2/2-1/second.html>> Acesso em 28.mar.2012.
- BOESWILLWALD, P. La perception du temps à travers les arts. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p. 181 – 187.
- BOUCHAREINE, P. Les longueurs et les temps. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p. 53 - 68.
- CARVALHO JR, G. D. e AGUIAR JR, O. G. Os campos conceituais de Vergnaud como ferramenta para o planejamento didático. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. v. 25, n. 2: p. 207-227, ago. 2008
- CARVALHO JR, G. D. e AGUIAR JR, O. G. Estudo Do Conceito De Tempo Em Estudantes De Ensino Médio: Uma Construção De Instrumentos De Análise. In: *IV Colóquio Internacional Educação e Contemporaneidade*. Atas. Aracaju: Educon. 2010.

CARVALHO JR, G. D., AGUIAR JR, O. G. e BRUNO, S. Invariantes operatórios utilizados por estudantes do ensino médio: o caso da transição entre conceitos clássicos e relativísticos. In : IX Encontro de Pesquisa em Ensino de Ciências. Atas. Águas de Lindoia : Abrapec. 2013

CARVALHO JR, G. D. e PARRAT-DAYAN, S. O schème de movimento como organizador da ação em mecânica clássica e relativística. In : *III Colóquio Internacional de Epistemologia e Psicologia Genéticas*. Anais. João Pessoa. 2013.

CARVALHO JR., G. D. As concepções de ensino de Física e a construção da cidadania. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. v. 19, n. 1: p. 53-66, abr. 2002

CARVALHO JR., G. D. Trajetória de aprendizagem de estudantes de ensino médio: produção de significados em um curso introdutório de Física Térmica. Dissertação (Mestrado em Educação) - Faculdade de Educação, UFMG, Belo Horizonte. 2005

CASTORINA, J. A. O debate Piaget-Vygotsky: A busca de um critério para sua avaliação. In: CASTORINA, José Antônio et all. *Piaget-Vygotsky: Novas contribuições para o debate*. São Paulo: Ática. 2008.

CHAUVIGNÉ, C. e COULET, J.C. L'approche par compétences : un nouveau paradigme pour la pédagogie universitaire ? *Revue Française de Pédagogie*. Lyon : École Normale Supérieure de Lyon. pp. 15-28. jul-set. 2010

CLEMENT, J. Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, v. 22, n. 9, p. 1041-1053. 2000.

CLOUGH, M. P.; OLSON, J. K. Teaching and assessing the nature of science: an introduction. *Science & Education*. v. 17, p. 143-145. 2008.

COSTA, S. e MOREIRA, M. A. Knowledge-in-action: an example with rigid body motion. *Research in Science & Technological Education*, v. 23, Issue 1, May, 2005. P. 99-122.

CUDMANI, L. C. e PESÁ, M. A. La evolución de los significados de los Conceptos científicos en relación con la estructura cognitiva de los Estudiantes. *Ciência & Educação*, v. 14, n. 3, p. 365-80, 2008

DUCRET, J. J. Comunicação pessoal. Université de Genève – Suíça. 12.02.2013.

DUCRET, J. J., SAADA, E. H. e JANET, F. *Temps, causalité et conduite durécit chez le jeune enfant*. Genebra : Département de l'instruction publique - Service de la recherche en éducation. 2008

DURANDEAU, J. P. *Mécanique relativiste*. Paris: Masson. 1980.

DUSCHL, R. Science Education in Three-Part Harmony: Balancing Conceptual, Epistemic, and Social Learning Goals. *Review of research in education*, n. 32. 2008.

EINSTEIN, A. & INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar. 2008.

EINSTEIN, A. *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Rio de Janeiro: Contraponto. 2009.

EINSTEIN, A. *On the electrodynamics of motion bodies*. Disponível em << <http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>>>. Acesso em 04.jan.2011.

- EULER, L. *Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y le materia*, Madri: Alianza Editorial. 1985
- ESCUADERO, C. e JAIME, E. A. Conocimientos-en-acción: un estudio acerca de la integración de las fuerzas y la energía en cuerpo rígido. *Investigações em Ensino de Ciências*. V. 14(1). pp. 115-133. 2009
- FANARO, M. A., ARLEGO, M. e OTERO, M. R. El Método de Camiños Múltiples de Feynman como Referencia para Introducir los Conceptos Fundamentales de la Mecánica Cuántica en la Escuela Secundaria. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 24, n. 2: p. 233-260, ago. 2007
- FANARO, M. A., OTERO, M. R. e MOREIRA, M. A. Theorems-in-action and concepts-in-action in two situations regarding the notion of quantum system. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*. Vol. 9 No 3, 2009.
- FEYNMAN, R. P. LEIGHTON, R. B. & SANDS, M. *Feynman Lições de Física*. Porto Alegre: Bookman. 2008. Volume 1.
- FUCHS, A. L'irréversibilité des phénomènes naturels à l'échelle macroscopique : Le point de vue d'un chimiste. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p.111 – 116.
- GALAND, B. Dangers, incertitudes et incomplétude de la logique de la compétence en éducation. *Revue Française de Pédagogie*. Lyon : École Normale Supérieure de Lyon. p. 97-110 jan-mar. 2006.
- GALILEI, G. *Dialogue sur les deux grands systemes du monde*. Paris: Éditions du Seuil. 1992.
- GAMOW, G. *Biography of Physics*. Nova Iorque: Harper & Row. 1961
- GARCIA, R. *O Conhecimento em Construção: Das formulações de Jean Piaget à teoria de sistemas complexos*. Porto Alegre: Artmed. 2002.
- GONZÁLEZ, S. B. e ESCUDERO, C. Las Unidades En Problemas De Física Para Escuela Secundaria. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 26, n. 3: p.460-477, dez. 2009.
- HAWKING, S. *O universo numa casca de noz*. São Paulo : Nova Fronteira. 2002.
- HESTENES, D. Modeling methodology for physics teachers. *Proceedings of the International Conference on Undergraduate Physics Education*, College Park, August 1996.
- HOMANN, U. Time Equivalence of the Tropical Year and the Sidereal Year. *Journal of Theoretics*. v. 3, n. 3, jun-jul. 2001
- INHELDER, B. Les opérations de classification dans la formation des concepts. *Acta Psychologica*, Vol.19, pp.656-663. 1961.
- JAKOB, P. Le rythme donne le temps. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p. 163 – 177.
- JEQUIER, F. Qu'est-ce que le temps vécu ? In : CARDINAL, C. ; JEQUIER, F. ; BARRELET, J.M. et BEYNER, A. *L'homme et le temps en Suisse : 1291 – 1991*. Bienne : Weber. 1991.

KARAN, R. A. S., CRUZ, S. M. S. C. S. & COIMBRA, D. Uma releitura metodológica para o Ensino de Relatividade Restrita. *Atas do X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*. Florianópolis. 2006.

KÖHNLEIN, J. F. K. & 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, abr. 2005.

LEDERMAN, N. G. Nature of Science: Past, Present, and Future. In: ABELL, S.K.; LEDERMAN, N. G.(ed.). *Handbook of research on Science Education*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, 2007. p. 831-880.

LEVAÏN, J. P., LE BORGNE, P. et SIMARD, A. Apprentissage de schémas et résolution de problèmes en SEGPA. *Revue Française de Pédagogie*. Lyon : École Normale Supérieure de Lyon. p. 95-109. abr-mai, 2006.

LEVRINI, O. e DiSESSA, A. How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 4, 2008.

MARTÍ, E. Mechanisms of internalisation and externalisation of knowledge in Piaget's and Vygotsky's theories. In : TRYPHON, A. e VONÈCHE, J. *Piaget – Vygotsky : The Social Genesis of Thought*. Erlbaum : Psychology Press. 1996. p. 57-84.

MARTINS, A. F. P. *Tempo Físico: a construção de um conceito*. Natal: Edufrn. 2007

MENEZES, L. C. *A matéria: uma aventura do espírito*. São Paulo: Livraria da Física. 2005.

MILNER, B. Why teach science and why to all? In: NELLIST, J. e NICHOLL, B. (eds.). *The Ase Science Teacher's Handbook*. Hutchinson, 1996. PP. 1-10.

MOREIRA, M.A. *Partículas e Interações*. Física na Escola. v.5(2), p.10-14, 2004.

MORTIMER, E. F. *Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências*. 1ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.

MOZZER, N. B. *O entendimento conceitual do processo de dissolução a partir da elaboração de modelos e sob a perspectiva da teoria dos Campos Conceituais*. Tese (Doutorado em Educação), Faculdade de Educação, UFMG, Belo Horizonte. 2013.

NEWTON, I. *Princípios Matemáticos*. São Paulo: Abril. 1983

NZAN, D. K., LOPES, J. B. e COSTA, N. Formação continuada de professores de Física, em Angola, com base num modelo didático para o campo conceitual de força. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n.3. 2012.

OSTERMANN, F. *Um Pôster para Ensinar Física da Partículas na Escola*. Física na Escola, v.2, p.13-18. 2001.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "física moderna e contemporânea no ensino médio". *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, mar. 2001.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade Restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 83-102, abr. 2004.

PAPERT, S. e VOYAT, G. *Le temps et l'épistémologie génétique*. In : PIAGET, J (ORG). Perception et notion du temps. EEG XXI. Paris : Presses Universitaires de France. 1967.

PARRAT-DAYAN, S. La réception de l'oeuvre de Piaget dans les milieux pédagogiques des années 1920–1930. *Revue Française de Pédagogie*, n. 104, 1993. p. 73–83.

PARRAT-DAYAN, S. Piaget, la psychologie et ses applications. A propos de l'article de Piaget "Pour l'étude de la psychologie". *Archives de Psychologie*, n. 65, 1997. p. 247–263. 1997

PARRAT-DAYAN, S. Égocentrisme enfantin : concept structurel ou fonctionnel ? In : *Bulletin de Psychologie*. V. 51 (5) set-out. 1998.

PARRAT-DAYAN, S. Comunicação pessoal realizada entre setembro de 2012 e junho de 2013.

PASCAL, B. *De l'esprit géométrique*. Paris : Éditions ebooks France. 2001. Disponível em : << http://www.ebooksgratuits.com/ebooksfrance/pascal_de_l_esprit_geometrique.pdf>>. Acesso em 12.01.2013.

PATY, M. L'espace-temps dans la théorie de la relativité. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p. 81 – 106.

PEREIRA, A. P., PESSOA JR, O., CAVALCANTI, C. J. H. e OSTERMANN, F. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 29, n. Especial 2: p. 831-863, out. 2012.

PETIT, G. La mesure du temps. In : PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001. p. 38 – 55.

PIAGET, J. & GARCIA, R. *Vers une logique des significations*. Genève : Muriende. 1987.

PIAGET, J & INHELDER, B. *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1968. 3^a ed. (1941).

PIAGET, J. & SZEMINSKA, A. *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1972. 4^a ed. (1941).

PIAGET, J. *Le langage et la pensée chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1976. 9^a ed. (1923).

PIAGET, J. *Le jugement et le raisonnement chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1993. 8^a ed. (1924).

PIAGET, J. *La représentation du monde chez l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France. 2008. (1926).

PIAGET, J. *La causalité physique chez l'enfant*. Paris : Félix Alcan. 1927.

PIAGET, J. *Le jugement moral chez l'enfant*. Paris : Félix Alcan. 1932.

PIAGET, J. *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1977. 9ª ed. (1936)

PIAGET, J. *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1967a. 4ª ed. (1937).

PIAGET, J. *Le développement de la notion de temps chez l'enfant*. Paris: Presses Universitaires de France. 1973. (1946).

PIAGET, J. *La psychologie de l'intelligence*. Paris : Armand Colin. 1947.

PIAGET, J. (org.) L'épistémologie du temps. *Études d'Épistémologie Génétique XX*. Paris : Presses Universitaires de France. 1966.

PIAGET, J. *Biologie et connaissance : Essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*. Paris : Gallimard. 1967b.

PIAGET, J. (org.) Perception et notion du temps. *Études d'Épistémologie Génétique XXI*. Paris : Presses Universitaires de France. 1967c.

PIAGET, J. *L'équilibration des structures cognitives : problème central du développement*. Paris : Presses Universitaires de France. 1975.

PIAGET, J. *Le possible et le nécessaire 1 : l'évolution des possibles chez l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France. 1981.

PIAGET, J. *Le possible et le nécessaire 2 : l'évolution du nécessaire chez l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France. 1983.

PIETTRE, B. *Les temps et ses représentations*. Paris: L'Harmattan. 2001

REZENDE JR. M. F. *O processo de conceitualização em situações diferenciadas na formação inicial de professoras de física*. Tese de Doutorado – CCE – UFSC. 2006.

ROAZZI, A. & CASTRO FILHO, J. A. O Desenvolvimento da Noção de Tempo como Integração da Distância e da Velocidade. *Psicologia : Reflexão e Crítica*. vol.14 n.3 Porto Alegre. 2001.

SAHELICES, C. C. La investigación en enseñanza desde la perspectiva de los campos conceptuales de Gérard Vergnaud: Resultados de investigaciones en Física. *Revista Educación y Pedagogía*. V.XVII. n.43. 2009

SALTIEL, E. e MALGRANGE J.-L. Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°616, 1325-1355. 1979

SANTOS, R. P. B. Relatividade restrita com o auxílio de diagramas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. v. 23. n. 2. pp. 238-246, ago. 2006.

SILVA JUNIOR, A. G., TENÓRIO, A. C., BASTOS, H. F. B. N. O perfil epistemológico do conceito de tempo a partir de sua representação social. *Ensaio*. v. 9. n. 2. 2007.

SPAGNOU, P. *De la relativité au GPS*. Paris : Éditions Ellipses. 2012

TERRAZAN, E. A. *Perspectivas Para a Inserção da Física Moderna na Escola Média*. Tese de Doutorado – FEUSP – USP. 1994.

VERGNAUD, G. et al. Epistemology and psychology of mathematics education. In : NESHER, P. ; KILPATRICK, J. (Eds.) *Mathematics and cognition: A research synthesis by International Group for the Psychology of Mathematics Education*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

VERGNAUD, G. & RÉCOPÉ, M. De Revault d'Allonnes à une théorie du schème aujourd'hui. *Psychologie Française*. N. 45-1. 2000. 35-50.

VERGNAUD, G. Psychologie du développement cognitif et Didactique des mathématiques. *Petit XX*. n° 22 pp. 51 à 69, 1989-1990

VERGNAUD, G. La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. v. 10, n. 23, p. 133-170, 1991a.

VERGNAUD, G. Langage et pensée dans l'apprentissage des mathématiques. In : Revue française de pédagogie. Volume 96, 1991b. pp. 79-86.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. In: NASSER, L. (Ed.). *Seminário internacional de educação matemática 1*, Rio de Janeiro. 1993, p. 1-26.

VERGNAUD, G. A comprehensive theory of representation for Mathematics Education. *Journal of Mathematical Behavior*, v. 2, n. 17, p. 167-181, 1998.

VERGNAUD, G. L'explication est-elle autre chose que la conceptualisation? In: LEUTENEGGER, F., SAADA-ROBERT, M. (Eds). *Expliquer et comprendre en sciences de l'éducation*. Genève: De Boeck, 2002. pp. 31-44.

VERGNAUD, G. Psicologia da Educação. In: PLAISANCE, E. e VERGNAUD, G. *As Ciências da Educação*. São Paulo: Edições Loyola, 2003.

VERGNAUD, G. Représentation et activité: deux concepts étroitement associés. *Atas do 1º Congresso Internacional Lógico-Matemática en Educación Infantil*. 2006. Disponível em <<<http://www.waece.org/cdlogicomatematicas/>>>. Acesso em 10.dez.2007.

VERGNAUD, G. ¿En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede Ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo? *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v.12, n.2, p.285-302, 2007.

VERGNAUD, G. *A criança, a matemática e a realidade*. Curitiba: Editora UFPR. 2009a.

VERGNAUD, G. O que é aprender? In: BITTAR, M. e MUNIZ, C. A. (orgs). *A Aprendizagem Matemática na perspectiva da Teoria dos Campos Conceituais*. Curitiba: CRV. 2009b. PP.13-35.

VERGNAUD, G. *La conceptualisation, clef de voûte des rapports entre pratique et théorie*. Disponível em <<<http://eduscol.education.fr/cid46598/la-conceptualisation-clef-de-voute-des-rapports-entre-pratique-et-theorie.html>>> Acesso em 10.fev.2012.

VERGNAUD, G. Comunicação pessoal. Université de Paris 8 – Saint Denis. 20.fev.2013.

VERGNAUD, G. Comunicação pessoal. Université de Paris 8 – Saint Denis. 20.jun.2013.

VIGOTSKI, L. S. *A Construção do Pensamento e da Linguagem*. São Paulo: Martins Fontes. 2009.

VIGOSTSKI, L. S. *A Formação Social da Mente*. São Paulo: Martins Fontes. 2005.

WELLS, G. Learning to use scientific concepts. *Cultural Studies of Science Education*. N.3. 329-350. 2008.

WHITROW, G.J. *O tempo na história: concepções do tempo da pré-história aos nossos dias*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar. 1993