

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO

JÚNIOR SACCON FREZZA

CONSTRUÇÃO DE MODELOS E TEORIAS FÍSICAS
Da Mecânica Clássica de Newton à Mecânica Relativística de Einstein

Um estudo em Epistemologia Genética

Porto Alegre

2015

JÚNIOR SACCON FREZZA

CONSTRUÇÃO DE MODELOS E TEORIAS FÍSICAS
Da Mecânica Clássica de Newton à Mecânica Relativística de Einstein

Um estudo em Epistemologia Genética

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Educação, sob orientação do Prof. Dr. Fernando Becker.

Porto Alegre

2015

CIP - Catalogação na Publicação

Frezza, Júnior Saccon

Construção de Modelos e Teorias Físicas: Da Mecânica Clássica de Newton à Mecânica Relativística de Einstein. Um estudo em Epistemologia Genética / Júnior Saccon Frezza. -- 2015.
95 f.

Orientador: Fernando Becker.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Educação, Programa de Pós-Graduação em Educação, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. Epistemologia Genética. 2. Aprendizagem em Física. 3. Modelos Explicativos. I. Becker, Fernando, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Fernando Becker, pelo amparo intelectual, pelo acompanhamento desta pesquisa e pela prestimosa orientação.

Aos professores do PPGEduc, em especial à Dra. Tania Beatriz Iwazsko Marques, pela acolhida e pelos belos debates.

Aos colegas dos seminários avançados, em especial Dr. Luciano Pereira Luduvico, pelas belíssimas contribuições.

À minha esposa Ma. Alessandra Blando pelas contribuições tanto afetivas quanto intelectuais.
A você minha gratidão.

À CAPES e ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.

A todos os alunos que participaram deste trabalho, pela disposição e interesse em realizar as entrevistas.

RESUMO

Esta pesquisa ressalta as contribuições da teoria piagetiana para o campo da aprendizagem em Física. Ela objetiva entender, mediante situação experimental, como os sujeitos relacionam os conhecimentos da mecânica clássica de Newton com os conhecimentos da mecânica relativística de Einstein. Embora a análise tenha sido realizada com conceitos da Física, o relacionamento entre diferentes teorias científicas pode ser estendido para as mais variadas áreas de conhecimento. Utilizando-se o Método Clínico piagetiano, foram propostas aos sujeitos situações passíveis de serem entendidas como conflitantes, com o intuito de que novos dados pudessem ser assimilados. Quando da incorporação, pelos sujeitos da pesquisa, de dados novos ao modelo explicativo, sucederam-se três consequências: aumento em extensão do modelo explicativo; aumento em compreensão do modelo explicativo; extinção do modelo explicativo surgindo, com isso, a possibilidade de elaboração de um novo modelo. Desde os sujeitos que buscam explicar os novos dados exclusivamente com o modelo newtoniano (Modelo M), passando pelos que diferenciam dois modelos explicativos ao mesmo tempo em que distinguem duas realidades (Modelos M – Modelo M'), até os que relacionam os dois modelos explicativos por meio de uma totalidade que permite compreender o grau de generalização de cada modelo (Modelos M ↔ Modelo M'), o papel da novidade produzida por eles tornou-se evidente. A análise dos dados coletados para esta tese indica que a consciência da evolução das teorias científicas, bem como suas possíveis relações, é ponto de chegada de um longo processo que começa por diferenciar, antes de relacionar, dois modelos explicativos. A emergência de um novo modelo surge no momento em que o modelo vigente não mais consegue explicar situações novas, integrar novos dados. A dificuldade de o sujeito compreender as causas da não aplicabilidade do modelo vigente às novas situações é o ponto de partida para sua reconstrução ou até para a construção de um novo modelo. Essa ideia se opõe a muitas metodologias de ensino utilizadas em sala de aula que consideram o aluno um receptáculo passivo destinado à aceitação acrítica de teorias. As conclusões desta tese permitem, no âmbito educacional, uma reflexão sobre como deveria ser a abordagem da evolução de teorias científicas em sala de aula e a sua importância para o avanço das ciências.

Palavras-chave: Epistemologia Genética; Aprendizagem em Física; Modelos Explicativos.

ABSTRACT

This survey enhances the contributions of piagetian theory to the learning field of Physics. In an experimental situation, it aims an understanding on how individuals associate knowledge of classical newtonian mechanics with the knowledge of Einstein's relativistic mechanics. Even though the analysis has been carried out with concepts of Physics, the relationship between distinct scientific theories can be understood for the most diverse fields of knowledge. Using the Piagetian Clinical Method, situations that could be understood as conflicting were proposed to the individuals with the purpose that new data could be assimilated. When the subjects of the survey internalized the new data of the explanatory model, there was a succession of three consequences: an increase in the extent of the explanatory model; an increase in understanding the explanatory model; extinction of the explanatory model arising, from that, the possibility of elaborating a new model. From the subjects in a search of explaining the new data with the newtonian model exclusively (M Model), through the ones that distinguish two explanatory models at the same time they recognize two realities (M Models –M' Model), and to the ones that connect the two explanatory models by means of a wholeness which allows the understanding of the extent of generalization of each model (M Models ↔ M' Model), the role of the novelty produced by them became evident. The analysis of the collected data to this thesis indicates that the awareness of the evolution of scientific theories and their possible relations are arrival point of a long process that starts in distinguish, before association, two explanatory models. The emergency of a new model arises when the current model cannot explain anymore new situations or integrate new data. The difficulty of the subject in understanding the causes of the non-applicability of the current model to the new situations is a starting point for the reconstruction or the construction of a new model. This idea opposes to a variety of methodologies of teaching used in classroom that consider the student a passive receptacle with no criticism to theories. The conclusions of this thesis allow, in the learning environment, discussion on how should be done the approach of the evolution of scientific theories in classroom and its importance to the progress of sciences.

Keywords: Genetic Epistemology; Physics Learning; Explanatory Models.

RESUMEN

Esta pesquisa resalta las contribuciones de la teoría piagetiana para el campo de aprendizaje en Física. Ella objetiva entender, mediante la situación experimental, cómo los sujetos relacionan los conocimientos de la mecánica clásica de Newton con los conocimientos de la mecánica relativista de Einstein. Aunque el análisis se haya realizado con los conceptos de la Física, la relación entre distintas teorías científicas puede extenderse para las más variadas áreas de conocimiento. Utilizándose el Método Clínico piagetiano, fueran propuestas a los sujetos situaciones pasibles de ser entendidas como conflictivas, con el objetivo de que nuevos datos se puedan asimilar. Cuando da incorporación, por los sujetos de la investigación, de nuevos datos de modelo explicativo, se sucederán tres consecuencias: aumento en extensión del modelo explicativo, aumento en comprensión del modelo explicativo; extinción del modelo explicativo surgiendo con eso, la posibilidad de elaboración de un nuevo modelo. Desde los sujetos que buscan explicar los nuevos datos exclusivamente con el modelo newtoniano (Modelo M), pasando por los que se diferencian de los modelos explicativos al mismo tiempo en que se distinguen dos realidades (Modelos M – Modelo M'), hasta que los relacionen los dos modelos explicativos por medio de una totalidad que permite comprender el grado de generalización de cada modelo (Modelos M ↔ Modelo M'), el papel de la novedad producida por ellos se convirtió evidente. El análisis de los datos colectados para esta tesis indica que la evolución de las teorías científicas, bien como sus posibles relaciones, es el punto de llegada de un nuevo proceso que empieza por diferenciar, antes de relacionar, dos modelos explicativos. La emergencia de un nuevo modelo surge en el momento en que el modelo vigente no consigue más explicar situaciones nuevas, integrar datos nuevos. La dificultad del sujeto comprender las causas de la no aplicabilidad del modelo vigente a las nuevas situaciones es el punto de partida para su reconstrucción o hasta para la construcción de un nuevo modelo. Esa idea si opone a muchas metodologías de enseñanza utilizada en clase que considera el alumno un receptáculo pasivo a una aceptación acrítica de las teorías. Las conclusiones de esta tesis permiten, en el ámbito educacional, una reflexión sobre como debería ser la abordaje de la evolución de las teorías científicas en clase y su importancia para el avance de las ciencias.

Palabras clave: Epistemología Genética; Aprendizaje en Física; Modelo Explicativo

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1 – BARRAS CARREGADAS ELETRICAMENTE.....	24
ILUSTRAÇÃO 2 – BARRAS CARREGADAS ELETRICAMENTE.....	25
ILUSTRAÇÃO 3 – FORÇA EXERCIDA SOBRE UMA CARGA DE PROVA.....	26
ILUSTRAÇÃO 4 – FOGUETE.....	28
ILUSTRAÇÃO 5 – FOGUETE.....	29
ILUSTRAÇÃO 6 – SIMULTANEIDADE DE DOIS EVENTOS.....	32
ILUSTRAÇÃO 7 – PROPAGAÇÃO DAS FRENTES DE ONDA.....	32
ILUSTRAÇÃO 8 – PROPAGAÇÃO DAS FRENTES DE ONDA.....	33
ILUSTRAÇÃO 9 – ESPAÇO RELATIVO.....	34
ILUSTRAÇÃO 10 – ESPAÇO RELATIVO.....	35
ILUSTRAÇÃO 11 – PÊNDULO SIMPLES PRESO NO TETO DE UM VAGÃO.....	55
ILUSTRAÇÃO 12 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CARGA ELÉTRICA E SEU CAMPO ELÉTRICO.....	56
ILUSTRAÇÃO 13 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CARGA ELÉTRICA.....	56
ILUSTRAÇÃO 14 – CARGAS ELÉTRICAS.....	57
ILUSTRAÇÃO 15 – CARGAS ELÉTRICAS.....	57
ILUSTRAÇÃO 16 – CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR UM ÍMÃ.....	58
ILUSTRAÇÃO 17 – CORRENTE ELÉTRICA EM UM FIO CONDUTOR.....	58
ILUSTRAÇÃO 18 – CORRENTE ELÉTRICA EM UM FIO CONDUTOR.....	58
ILUSTRAÇÃO 19 – BARRAS CARREGADAS ELETRICAMENTE.....	59
ILUSTRAÇÃO 20 – BARRAS CARREGADAS ELETRICAMENTE.....	60
ILUSTRAÇÃO 21 – MÚON SE APROXIMANDO DA TERRA.....	61
ILUSTRAÇÃO 22 – SITUAÇÃO 1: FORÇA SOBRE CARGA DE PROVA.....	66
ILUSTRAÇÃO 23 – SITUAÇÃO 2: FORÇAS SOBRE CARGA DE PROVA.....	67
ILUSTRAÇÃO 24 – MÚON EM MOVIMENTO EM DIREÇÃO À TERRA.....	70

ILUSTRAÇÃO 25 – MODELO M E SUA APLICABILIDADE.....	76
ILUSTRAÇÃO 26 – MODELO M E SUA APLICABILIDADE FRENTE À TOTALIDADE DAS SITUAÇÕES.....	76
ILUSTRAÇÃO 27 – MODELO M E SUA NÃO-APLICABILIDADE.....	77
ILUSTRAÇÃO 28 – MODELOS M E M' E SUAS APLICABILIDADES.....	81
ILUSTRAÇÃO 29 – MODELOS M E M' E A RELAÇÃO ENTRE SUAS APLICABILIDADES.....	83
ILUSTRAÇÃO 30 – RELAÇÃO ENTRE OS MODELOS M E M'.....	85
ILUSTRAÇÃO 31 – SUCESSÃO DE TEORIAS.....	86

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.2. CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MECÂNICA CLÁSSICA DE NEWTON.....	19
3. ELETRODINÂMICA E O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE GALILEANA.....	21
4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MECÂNICA RELATIVÍSTICA DE EINSTEIN.....	27
5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A EPISTEMOLOGIA GENÉTICA.....	38
5.1. NOÇÃO DE ESPAÇO.....	38
5.2. NOÇÃO DE TEMPO.....	42
5.3. ABSTRAÇÃO REFLEXIONANTE.....	45
5.4. MODELOS DESCRITIVOS E EXPLICATIVOS NA FÍSICA.....	49
6. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	53
6.1. PARTICIPANTES.....	54
6.2. PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS.....	54
6.3. INSTRUMENTOS PARA A COLETA DE DADOS.....	55
6.4. MÉTODO DE COLETA DE DADOS.....	61
7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS.....	63
7.1. SOBERANIA DO MODELO EXPLICATIVO BASEADO NA MECÂNICA CLÁSSICA.....	75
7.2. DIFERENCIAÇÃO DOS MODELOS EXPLICATIVOS COMO CONDIÇÃO PARA RELACIONAR A MECÂNICA DE NEWTON COM A DE EINSTEIN.....	78
7.3. COORDENAÇÃO DOS MODELOS EXPLICATIVOS.....	82
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
REFERÊNCIAS.....	93

1. INTRODUÇÃO

Diferentemente do que muitos pensam, o fato de um sujeito ter 18 anos ou estar numa universidade não garante que seu pensamento seja operatório formal. Porém, mesmo que o seja, isso não é condição suficiente para que o sujeito possa assimilar todos e quaisquer conteúdos que lhe interessar. Se compararmos um sujeito operatório formal de 12 anos com um sujeito também operatório formal de 20 anos, por exemplo, notaremos grandes diferenças, seja na estabilidade das estruturas construídas, seja no grau de complexidade dos conteúdos que estas estruturas podem assimilar. Compreender que existe uma evolução no pensamento dos sujeitos, mesmo no período operatório formal, é fundamental para entendermos os pressupostos e as consequências desta tese.

Referindo-nos aos conteúdos de Física envolvidos nesta tese, não levar em consideração a evolução do pensamento formal de acordo com as ações do sujeito, seria admitir que os estudantes que dominam a mecânica clássica de Newton dominariam, também, sem a necessidade de novas construções, a mecânica relativística de Einstein. É notório que cada teoria tem suas peculiaridades e complexidades, o que exige, do sujeito que objetiva a sua compreensão, atualizar seu sistema cognitivo de acordo com cada conteúdo que busca assimilar.

É quase verdadeiro que uma das características essenciais do pensamento formal parece-nos ser a independência da forma com relação ao conteúdo. No nível das operações concretas, uma estrutura não pode ser generalizada a conteúdos heterogêneos diferentes, porém permanece ligada a um sistema de objetos ou propriedades desses objetos [...]. Uma estrutura formal parece, ao contrário, generalizável, enquanto lida com hipóteses. Porém, uma coisa é dissociar a forma do conteúdo em um campo que seja do interesse do sujeito e dentro do qual ele possa aplicar sua curiosidade e iniciativa, e outra é estar apto para generalizar esta mesma espontaneidade de investigação e compreensão a um campo estranho à carreira e aos interesses do sujeito. (PIAGET, 1993, p. 8)

Essas peculiaridades e complexidades mostram-se evidentes ao analisar os esforços dos estudantes em interpretar fenômenos relacionados à mecânica clássica e muito mais à mecânica relativística, sejam eles alunos do nível médio ou superior. Parece curioso, à primeira vista, que, mesmo objetivando interpretar a realidade no que tange ao movimento dos corpos, a construção das noções subjacentes à mecânica não são de fácil elaboração, pois exige um considerável grau de formalidade. Ao analisarmos mais profundamente a elaboração

dessas noções, notaremos que isso coincide com determinadas afirmações de estudantes como “Física é coisa de outro mundo”. Este *outro mundo* nada mais é do que os modelos que a Física estabelece para compreender a realidade, enunciados em elevado nível de formalidade. O aluno interessado em compreender a realidade terá que, por esforços próprios, (re)criar tais modelos. Na mecânica relativística einsteiniana, os modelos elaborados pelos estudantes, visando a compreender os fenômenos relativísticos, vão muito além da realidade como é concebida por muitos deles, resultando em confrontos radicais entre os novos conteúdos – e as relações entre eles que se busca compreender – e conhecimentos pertinentes construídos anteriormente.

Buscou-se, neste trabalho, compreender como os alunos estabelecem relações entre os modelos (explicativos ou descritivos) da mecânica de Newton e os de Einstein. Uma das formas com a qual se pode investigar essas relações consistiria em analisar situações a partir dos referenciais inerciais. Isto porque no estudo dos movimentos, tanto na Mecânica Newtoniana quanto na einsteiniana, é necessária, para a análise de um determinado fenômeno, a adoção de um referencial. No entanto, ao mesmo tempo em que há relações de convergência, há também de divergência no momento em que se entende que, na mecânica clássica de Newton, os referenciais inerciais são válidos para as leis da mecânica, enquanto na mecânica einsteiniana eles seriam válidos para todas as leis da Física.

Para a realização desta pesquisa, adotei, como base teórica, a Epistemologia Genética de Jean Piaget, principalmente a teoria da abstração reflexionante. Ela oferece subsídios importantes para a análise dos dados, que foram coletados com o uso do método clínico piagetiano. Ela possui envergadura capaz de explicar o desenvolvimento cognitivo do sujeito epistêmico.

Destacarei, no decorrer deste trabalho, a importância dessa abordagem para o ensino de Física e, por consequência, para a Educação. As hipóteses formuladas emergem de pesquisas anteriores por mim realizadas, e de minha vivência como professor de Física. Posteriormente a elas, fiz um estudo sobre aspectos relevantes da mecânica clássica, do eletromagnetismo e da Teoria da Relatividade Restrita/TRE, salientando a importância dos referenciais inerciais. Por fim, detalho a metodologia aplicada nesta pesquisa, bem como a análise dos dados coletados e as conclusões a que cheguei.

Esta investigação foi realizada com a utilização do método clínico piagetiano como instrumento de coleta de dados. Os sujeitos da pesquisa foram alunos regularmente

matriculados na disciplina Física III vinculada ao Departamento de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS.

1.1. OBJETIVOS

Por meio da Epistemologia Genética de Jean Piaget, buscou-se entender como os sujeitos relacionam os conhecimentos da mecânica clássica de Newton com os conhecimentos da mecânica relativística de Einstein. Dessa forma, pode-se pensar sobre como abordar os conteúdos da mecânica relativística em sala de aula, partindo de uma metodologia que compreenda o aluno como sujeito ativo de sua aprendizagem. Este trabalho objetivou também dar continuidade à dissertação de mestrado defendida e aprovada por banca julgadora no Programa de Pós-Graduação em Educação da UFRGS intitulada *Noções de Referencial Inercial: um estudo de Epistemologia Genética com alunos de Física* (FREZZA, 2011). Pretende-se, com este trabalho, contribuir para a compreensão dos processos de aprendizagem e para a elaboração de uma metodologia de ensino que propicie ao professor refletir sobre a intencionalidade de sua prática docente.

1.2. CONFIGURAÇÃO DO PROBLEMA

A configuração do problema desta tese funde-se com minha própria trajetória de pesquisas até o momento. Em 2006, ainda na graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Pelotas/UFPel, escrevi meu primeiro trabalho científico intitulado *Investigação dos obstáculos epistemológicos apresentados por alunos de uma disciplina introdutória à Teoria da Relatividade Restrita* (FREZZA, DAMASCENO & AYALA, 2006). Naquele trabalho, os dados foram obtidos por meio da aplicação de um teste, contendo a seguinte pergunta:

A partir de colisões de partículas de raios cósmicos ocorre a produção de múons na atmosfera a uma altura de 9000 m. Considerando que estes possuem velocidade de, aproximadamente, $0,998c$ e tempo de vida igual a $2 \times 10^{-6}s$, os múons poderiam deslocar-se apenas 600 m e não poderiam atingir a superfície da Terra. No entanto, estes múons são detectados na superfície. Explique esta situação a partir (a) de um referencial onde a Terra está em repouso; (b) de um referencial onde o múon está em repouso

Com a análise dos dados, a conclusão dos autores supracitados foi de que:

Os nossos resultados indicam a existência de três regiões: a região caracterizada pelo senso comum, onde os conceitos de observador e referencial se confundem com o próprio sujeito; a região caracterizada pela física newtoniana; e a região associada à TRE. Concluímos que a associação dos alunos à região do senso comum estabelece um obstáculo epistemológico à compreensão da TRE.

Realizei outros trabalhos acerca do mesmo tema¹, porém à luz de outras teorias e constructos teóricos que não os da Epistemologia Genética de Jean Piaget. Hoje entendo que, objetivando dominar as bases da teoria piagetiana, todos os trabalhos anteriores a este foram necessários para a realização desta tese. Mesmo me fundamentando em autores que não tinham como base teórica a Epistemologia Genética de Jean Piaget, como Mortimer, Bachelard e Moreira, os trabalhos realizados com tais referências deram início à formação de um pesquisador. Neste contexto trago a configuração do problema desta pesquisa.

A capacidade de operar sobre hipóteses, própria do pensamento formal, permite ao sujeito desvincular seu pensamento do mundo concreto, potencializando seus modelos de interpretação da realidade. Na medida em que o sujeito, inconscientemente, vai elaborando e complexificando essa capacidade, exige cada vez mais coerência entre a realidade observada e os modelos criados para interpretá-la. No entanto, essa cada vez maior coerência entre os modelos elaborados pelo sujeito e a realidade não é fecunda apenas em grandes reconstruções como na elaboração do pensamento formal em detrimento do pensamento concreto, mas também o é ao longo de todo o desenvolvimento característico do pensamento formal que não cessa jamais de se desenvolver. Isso gera diversos conflitos cognitivos entre o que já se compreende da realidade e o que se pode assimilar dela.

A realidade deve servir como conteúdo para o sistema cognitivo do sujeito que busca compreendê-la e não como causa de sua própria interpretação. As noções relacionadas à mecânica não são de fácil construção, pois não são originárias da realidade, mas da interação entre o sujeito e a realidade que o cerca. Essas noções exigem, por sua vez, um grau de formalidade, em especial as da mecânica relativística, na qual os fenômenos analisados vão muito além da realidade concebida por muitos dos estudantes, resultando em confrontos radicais entre os novos conteúdos e parte dos conhecimentos já construídos. São estes confrontos (possíveis apenas pela ação do sujeito) entre a novidade e os conhecimentos já

¹(FREZZA, DAMASCENO & AYALA FILHO, 2006b), (FREZZA & AYALA, 2007), (AYALA & FREZZA, 2007)

estabelecidos que fazem o sujeito se desenvolver cognitivamente, resultando, muitas vezes, na refutação dos conhecimentos até então entendidos como gerais e imutáveis.

Algo parecido acontece na ciência. Um novo dado obtido ou corrobora ou coloca à prova uma teoria ou um conjunto de modelos. Einstein, em 1905, publicou cinco artigos que mudaram os rumos da Física. Em *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento* (EINSTEIN, 2005a) e em *A inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?* (EINSTEIN, 2005b) apresenta a elaboração da TRE, mostrando o caráter particular da mecânica clássica newtoniana compreendida até então como insuperável e geral.

O advento da TRE pode ser caracterizado como uma revolução científica que modificou profundamente as categorias básicas utilizadas na descrição da natureza, não só da Mecânica Newtoniana, mas de toda a Física. Uma das comparações, que podem ser feitas, sobre a mecânica de Newton e a de Einstein refere-se ao grau de generalização. Na visão de Galileu e Newton, **as leis da mecânica são válidas para qualquer referencial inercial**. Einstein não apenas superou a mecânica clássica newtoniana, mas elaborou uma nova interpretação da Física ao afirmar que são **as leis da Física válidas para qualquer referencial inercial**, e não somente as da mecânica. Essa nova interpretação foi um grande avanço para a unificação dos efeitos magnéticos e elétricos. A partir das ideias de Einstein, não apenas as leis da mecânica devem ser descritas por meio de referenciais inerciais, mas toda a Física. Essa sutil diferença de enunciados traz consigo uma grande revolução na Física e, frente a isso, me pergunto: será que os alunos de uma disciplina que envolve o estudo da TRE conseguem compreender o que tal diferença implica na Física?

Como licenciado em Física, consta em meu currículo a experiência de ter cursado a disciplina *Introdução à Relatividade*. Nessa oportunidade consegui vivenciar minhas dificuldades e de meus colegas em agir sobre os conteúdos da teoria da relatividade de Einstein. Alguns autores (VILLANI E PACCA, 1990; SCHERR, SHAFFER E VOKOS, 2001; AYALA, 2010) buscam compreender o porquê da dificuldade dos alunos em entender a teoria da relatividade de Einstein. Muitos, baseando-se nas ideias de Ausubel, Bachelard, Mortimer, afirmam que a confrontação das ideias da TRE com as da mecânica clássica newtoniana gera os chamados obstáculos epistemológicos (BACHELARD, 1987). Dentro dessa visão, quando um sujeito busca ancorar um novo conhecimento (no caso a TRE) em uma região do conhecimento relacionada à mecânica clássica, criar-se-ia um obstáculo epistemológico, visto tratar-se de conteúdos incomensuráveis. Realmente os conteúdos são

incomensuráveis, mas será que em função disso não se pode agir com os esquemas até então construídos?

Acredito que este processo acontece de outra forma. O sujeito passa de um estado de menor conhecimento para um estado de maior conhecimento por meio de rupturas estruturais, porém com continuidade funcional.

[...] uma transposição de estruturas de um patamar inferior ao patamar seguinte de reflexionamento é, naturalmente, a fonte de múltiplos desequilíbrios devido às novas dimensões a considerar do que decorre a necessidade de novas acomodações e assimilações [...] (PIAGET, 1995, p. 284).

É assimilando caracteres do objeto de conhecimento e acomodando a eles seu sistema cognitivo que o sujeito evolui, isto é, se desenvolve. Se a construção de uma teoria é realizada por inúmeros processos de abstração reflexionante (PIAGET, 1995), o produto desta não poderia contradizer tudo o que possibilitou sua construção.

[...] devido ao fato de que a abstração reflexionante vem a apreender as razões intrínsecas das coordenações que reconstrói e amplia por ocasião de seus reflexionamentos, atinge este notável resultado: um novo produto da reflexão não poderia contradizer os precedentes (PIAGET, 1995, p. 290).

Diante disso, entendo que a mecânica clássica newtoniana auxilia na construção dos conhecimentos referentes à TRE, mesmo sendo conteúdos diferentes ou ditos incomensuráveis.

O sujeito aplica um esquema ou um conjunto de esquemas a uma situação, visando a dar significado a algum fenômeno dessa situação. Dito de outra forma, elabora modelos para explicar a realidade. Quando as propriedades retiradas dessa situação são interpretadas como conflituosas frente a tudo o que o sujeito compreende, surge a possibilidade de construção de novos conhecimentos ou capacidades, e não algo que a impeça, como um obstáculo epistemológico – a não ser que o conflito seja tão grande que o sujeito não se disponha a enfrentá-lo. Poderia dizer que estas situações conflituosas são mais possibilidades epistemológicas do que obstáculos. Gerando situações que permitam ao sujeito superar tais conflitos, viabiliza-se a possibilidade dele se desenvolver cognitivamente, reorganizando seu sistema cognitivo para que dê conta de complexidades maiores, potencializando, assim, suas capacidades.

Tomando-se como exemplo um sujeito que supostamente domine os conteúdos da Mecânica Newtoniana, ele se utilizará das construções cognitivas, que foram necessárias para significar a Mecânica Newtoniana, para agir sobre os conteúdos oriundos da mecânica relativística de Einstein? Ou seria necessário abandonar essas construções e partir de um estado puro, no qual nenhuma noção controversa poderia servir de empecilho para a aprendizagem da TRE?

Sob a ótica da Epistemologia Genética, essa última pergunta não faz sentido. O sujeito busca assimilar o objeto de conhecimento por meio de seus esquemas e estruturas. O que o sujeito construiu até então serve como estrutura base para a ação do sujeito frente ao que se busca assimilar. Alguns poderiam afirmar que seria necessário abandonar conceitos utilizados na mecânica clássica newtoniana para se criar um suporte aos conteúdos da TRE. Porém, para se criar um suporte para uma teoria, é necessário que algo possibilite esta criação. Parece-me coerente que este *algo* seja tudo o que o sujeito construiu ao longo de sua vida.

Como professor de Física e interessado nos processos de ensino e de aprendizagem, busco analisar as concepções e os processos cognitivos referentes à aprendizagem da TRE, visto que esse conhecimento é de grande importância para a compreensão de muitos fenômenos físicos. Tenho como hipótese que a TRE só pode ser entendida se os sujeitos tiverem uma noção clara de referencial, mesmo que esta, inicialmente, seja construída para a mecânica clássica. Dentre algumas noções de referencial (FREZZA, 2011), o sujeito pode adotar a si próprio como referencial, adotar um objeto como referencial ou criar um referencial desvinculado de objetos físicos e observadores. Essas noções servem como base para casos particulares da Mecânica Newtoniana. No entanto, na relatividade einsteiniana, cada ponto no espaço deve ser compreendido como um suporte para um referencial, já que, nesse contexto teórico, espaço e tempo não são absolutos.

Poder-se-ia pensar – mesmo que equivocadamente – que a principal diferença entre a mecânica clássica e a mecânica relativística de Einstein é que esta busca explicar movimentos de objetos que se deslocam no espaço com altas velocidades, comparáveis à velocidade da luz, enquanto a mecânica clássica explica fenômenos com baixa velocidade. Normalmente, encontram-se velocidades próximas às da luz quando se objetiva interpretar fenômenos relacionados ao mundo microscópico. Porém isso não quer dizer que a mecânica clássica está para o mundo macroscópico assim como a mecânica relativística de Einstein está para o mundo microscópico. Nem mesmo que a mecânica clássica é um caso particular da relativística.

Creio que a maior diferença entre as duas mecânicas é que a clássica traz consigo as ideias de Newton sobre espaço e tempo, considerados absolutos, enquanto que, na visão de Einstein, o espaço e o tempo são relativos. Na mecânica clássica, por exemplo, pode-se mensurar a velocidade de um automóvel, que se desloca no espaço com velocidade constante em relação a um referencial inercial, a partir de um único referencial. Isso porque o espaço e o tempo são considerados absolutos. Utilizando-se, então, apenas um referencial, pode-se calcular duas posições em dois instantes de tempo, possibilitando determinar a velocidade do automóvel.

Tomando-se como possível que um automóvel se desloque com velocidade próxima à da luz, haveria incoerência nos resultados obtidos se alguém os interpretasse a partir de um pensamento baseado na mecânica clássica newtoniana. A relação entre espaço e tempo da mecânica clássica deixa de ser válida justamente porque espaço e tempo são relativos, e não absolutos como na mecânica clássica. Na TRE, um referencial está associado à um conjunto de eixos cartesianos com um observador munido de um relógio em cada ponto do referencial. Assim, para determinar uma velocidade, são necessários dois observadores do mesmo referencial. Ou seja, dois observadores em repouso relativo e que compartilhem da mesma escala de tempo (possuam relógios sincronizados).

Mas, qual seria a diferença de se explicar um fenômeno a partir da mecânica clássica newtoniana ou da mecânica relativística einsteiniana? A principal diferença é que na mecânica relativística de Einstein é necessário entender que espaço e tempo são relativos, residindo ali a razão de se alocar um referencial inercial em cada ponto do espaço. A partir disso, apresento meu problema de pesquisa: **Que relações são construídas pelos estudantes entre os modelos explicativos da mecânica clássica de Newton e da mecânica relativística de Einstein?**

Busca-se na Epistemologia Genética o suporte teórico para a compreensão dos processos de pensamento envolvidos na compreensão da Mecânica Newtoniana, da einsteiniana e em especial da transição da visão newtoniana à visão einsteiniana das relações entre espaço e tempo. O objetivo desta tese é atingir a compreensão desses processos para lograr novas possibilidades para o ensino da TRE.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MECÂNICA CLÁSSICA DE NEWTON

Um sistema de referência requer um sistema de coordenadas, permitindo que um observador, em posse de um relógio ou de um conjunto de relógios, mensure posição, velocidade, aceleração, etc. Einstein (1999, p. 14) afirma que “toda descrição de lugar (ou posição) onde ocorreu um evento ou onde se encontra um objeto se baseia em indicarmos o ponto de um corpo rígido (corpo de referência) com o qual aquele evento coincide. Este procedimento se aplica não apenas para a descrição científica, mas também para a vida diária”. Porém, este procedimento não nos possibilita uma generalização suficiente para a construção do conceito de referencial.

[...] essa maneira primitiva de especificar a posição só se aplica a lugares situados na superfície de corpos rígidos e depende de existirem pontos distinguíveis sobre tal superfície. Vejamos como a mente humana consegue libertar-se destas duas limitações, sem que a essência do método de especificar a posição sofra alteração [...]. A física das medidas consegue isso com o emprego do sistema cartesiano de coordenadas. Este sistema consiste em três paredes planas, perpendiculares entre si e unidas de maneira a formar um corpo rígido. A posição de um evento qualquer em relação ao sistema de coordenadas é descrito, no essencial, indicando-se os comprimentos das três perpendiculares, ou coordenadas (x, y, z) , que podem ligar o evento àquelas três paredes planas (EINSTEIN, 1999, p. 14-15).

Einstein explicita, nessas passagens, o conceito de referencial. Porém, as leis da mecânica clássica são aplicadas apenas a um determinado conjunto de referenciais (inerciais), para o qual são válidas as leis de Newton. Nesse conjunto, todos os observadores que se utilizassem dele mensurariam a mesma aceleração para uma partícula. Ou seja, as medidas feitas a partir de referenciais inerciais estão de acordo com as três leis de Newton (2012, p. 53-54):

1. Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.
2. A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.
3. A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.

Analisando uma situação na qual uma partícula p se move com velocidade u em relação a dois referenciais inerciais – R e R' , por exemplo –, podem-se estabelecer as seguintes relações entre as medidas efetuadas, conhecidas como as transformações de Galileu:

$$\begin{array}{l} x = x' + v \cdot t \\ y = y' \\ z = z' \end{array} \qquad \begin{array}{l} u_{Rx} = u_{R'x} + v \\ u_{Ry} = u_{R'y} \\ u_{Rz} = u_{R'z} \end{array}$$

Nestas transformações, x representa a componente da posição da partícula na direção x em relação a R ; x' representa a componente da posição da partícula na direção x em relação a R' ; v representa a velocidade relativa entre R e R' ; u_{Rx} representa a componente da velocidade da partícula na direção x em relação a R ; e $u_{R'x}$ representa a componente da velocidade da partícula na direção x em relação a R' .

Para a Mecânica Newtoniana, não há a necessidade de explicitar as transformações de Galileu para a aceleração (assim como fizemos para a posição e para a velocidade), pois, para que as transformações de Galileu sejam aplicáveis na mecânica clássica, a aceleração mensurada por todos os referenciais inerciais deve ser a mesma, satisfazendo, assim, as leis de Newton. Einstein (1999, p.19) afirma que:

[...] se K for um sistema de coordenadas galileano, todo outro sistema de coordenadas K' que executa em relação a K um movimento de translação uniforme também é um sistema de coordenadas galileano. Em relação a K' , as leis da mecânica de Galileu-Newton são tão válidas como em relação a K .

Se, por exemplo, fizermos experiências de mecânica no interior de um navio (do qual não se possa observar o exterior), que se desloca com velocidade constante não nula (em relação a um referencial inercial) em águas calmas de um lago, os tripulantes do navio que executam as experiências não poderão afirmar se o navio está parado ou em movimento retilíneo uniforme em relação a um referencial fixo na margem. Assim, pode-se evidenciar o princípio da relatividade de Galileu da seguinte forma: as leis da mecânica são as mesmas em relação a todos os referenciais inerciais.

3. ELETRODINÂMICA E O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE GALILEANA

Na primeira metade do século XIX, a Física era enriquecida por novos domínios: compreensão dos fenômenos eletrostáticos e magnéticos, das leis mais simples da óptica, do calor, da acústica, etc. Havia o interesse da comunidade científica para que todos os fenômenos físicos fossem descritos, não só por palavras, mas também por fórmulas capazes de prever o seu desenvolvimento.

James Clerk Maxwell (1831 – 1879) pode ser considerado o iniciador da Física-Matemática e o responsável pela interpretação moderna de vários fenômenos, especialmente daqueles ligados ao eletromagnetismo e às ondas eletromagnéticas. Entre 1860 e 1865, Maxwell conseguiu descrever matematicamente os fenômenos elétricos e magnéticos com um só grupo de fórmulas, unificando as leis de Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Faraday e Lenz. Mas, além da descrição matemática, Maxwell explicou como se relacionam os fenômenos elétricos e magnéticos elaborando, assim, a teoria eletromagnética expressa na forma de quatro equações, conhecidas como *equações de Maxwell*.

Partindo das equações de Maxwell, obtém-se que a velocidade de uma onda eletromagnética é constante. Por esse valor se aproximar muito do valor conhecido na época para a velocidade da luz (c), inferiu-se que a luz era uma onda eletromagnética. Dessa forma, a luz poderia ser explicada por uma relação de campos, magnético (**B**) e elétrico (**E**), movendo-se a uma velocidade constante cujo valor se aproximaria de 3×10^8 m/s. Sobre a relação da velocidade das ondas eletromagnéticas com a luz, Maxwell (*apud* ROCHA, 2002, p. 264) é esclarecedor, afirmando que

A velocidade das ondulações transversais no nosso meio hipotético, calculada a partir das experiências de eletromagnetismo efetuadas pelos Srs. Kollhraush e Weber (311.000 km/s), tem um valor tão próximo do valor da velocidade da luz calculado a partir de experiências da óptica realizadas pelo Sr. Fizeau que é difícil evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos.

Maxwell demonstrou, com sua teoria unificada, não só o comportamento ondulatório do eletromagnetismo como também que as ondas eletromagnéticas são geradas sempre que cargas elétricas são aceleradas. Portanto, ele foi capaz de explicar o fato de que as ondas eletromagnéticas seriam radiadas por qualquer circuito no qual correntes alternadas fluem.

Esses resultados foram confirmados através do primeiro transmissor-receptor de rádio, construído por Hertz, em 1887, logo após a morte de Maxwell.

Mas se a luz tem velocidade c , esta velocidade é mensurada a partir de qual referencial? Exigiria, então, a eletrodinâmica a adoção de um referencial privilegiado cujo valor para a velocidade da luz seja c ? Se isso for verdade, então o princípio da relatividade galileana seria aplicável às leis de Newton, da mecânica clássica, mas não às leis da eletrodinâmica de Maxwell? Sabe-se que, frente às transformações de Galileu, as leis de Newton são invariáveis, mas o seriam tais, também, as leis da eletrodinâmica?

Frente a estes questionamentos, podem-se elaborar três possibilidades:

1. O princípio da relatividade é válido para a mecânica clássica, mas não para a eletrodinâmica. Para a descrição dessa, seria exigida a adoção de um referencial privilegiado (relacionado ao espaço absoluto, materializado com o éter luminífero²). Se isso for verdade, poder-se-ia, experimentalmente, localizar o sistema do éter.
2. O princípio de relatividade é válido tanto para a mecânica clássica quanto para a eletrodinâmica, mas as leis da eletrodinâmica, como são dadas por Maxwell, estão incorretas. Se isso for verdade, poder-se-ia, experimentalmente, demonstrar os desvios das leis de Maxwell e reformular a eletrodinâmica;
3. O princípio de relatividade é válido tanto para a mecânica clássica quanto para a eletrodinâmica, porém as leis da Mecânica Newtoniana estão incorretas. Se isso for verdade, poder-se-ia, experimentalmente, demonstrar os desvios da mecânica clássica e reformular suas leis. Nesse caso, o próprio princípio da relatividade de Galileu teria que ser reformulado, tornando-o consistente com as leis da eletrodinâmica, exigindo a formulação de uma nova mecânica.

² Como a luz se propaga no espaço interestelar e interplanetário, onde praticamente não existe matéria, uma interpretação mecanicista das ondas eletromagnéticas seria a existência de um meio muito especial preenchendo todas as regiões, batizado de éter luminífero. Assim, a luz teria um meio onde se propagar, mesmo no vácuo, e a velocidade de 300.000 km/s devia ser em relação ao éter, ou a qualquer referencial em repouso em relação ao éter.

Com indícios cada vez mais fortes da não comprovação da existência de um meio luminífero (éter), Einstein, em 1920, relata que

Na construção da teoria da relatividade especial, a seguinte [...] ideia a respeito da indução eletromagnética de Faraday desempenhou um papel orientador. De acordo com Faraday, o movimento relativo entre um ímã e um circuito elétrico fechado induz uma corrente elétrica neste último. Se é o ímã ou o condutor que se move, isso não importa; apenas o movimento relativo tem significado. [...] O fenômeno da indução eletromagnética [...] levou-me a postular o princípio da relatividade (especial) (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2005, p. 130).

Isso porque

Mecanicamente, todos os referenciais inerciais são equivalentes. De acordo com a experiência, essa equivalência também estende-se à óptica e à eletrodinâmica. Entretanto, não me parecia que a equivalência pudesse ser obtida na teoria eletrodinâmica. Logo fiquei convencido de que isso baseava-se em uma profunda incompletude do sistema teórico. O desejo de descobrir e superar isso gerou em mim um estado de tensão psíquica que, após sete anos de pesquisas em vão, foi resolvido pela relativização dos conceitos de tempo e de comprimento (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2005, p. 129).

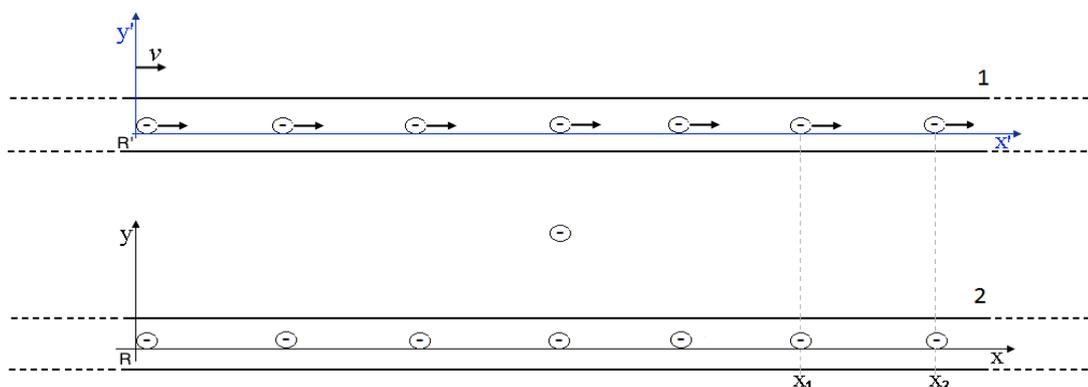
Como as hipóteses 1. e 2., acima, não puderam ser comprovadas experimentalmente, Einstein acabou elaborando uma teoria que confrontaria os conceitos amplamente aceitos pela comunidade científica da época que viam na mecânica clássica a fonte de explicação de todos os fenômenos. Relativizando os conceitos de espaço e tempo, construiu a TRE. Dessa forma, é válido o princípio da relatividade na eletrodinâmica, mas não o dado pelas transformações de Galileu.

Lorentz, que já tinha previsto matematicamente a contração do espaço, não conseguia explicar com argumentos físicos, mesmo se ocupando da mecânica, o problema da contração dos comprimentos. Coube a Einstein utilizar-se das transformações de Lorentz e dar uma explicação física para o fenômeno. Dessa forma, o princípio da relatividade na eletrodinâmica e, consequentemente na TRE, utiliza-se das transformações de Lorentz e não as de Galileu.

O que isso mudaria na prática? Abaixo, analisarei um problema (que será utilizado como uma parte do instrumento de coleta de dados) para exemplificar a diferença em se adotar o princípio da relatividade de Galileu em vez do princípio da relatividade de Einstein.

Imaginam-se duas barras homogêneas longas, ambas tendo a mesma densidade de cargas elétricas. Fixa-se, às barras, referenciais R e R' , como mostra a ilustração abaixo:

Ilustração 1 – Barras carregadas eletricamente



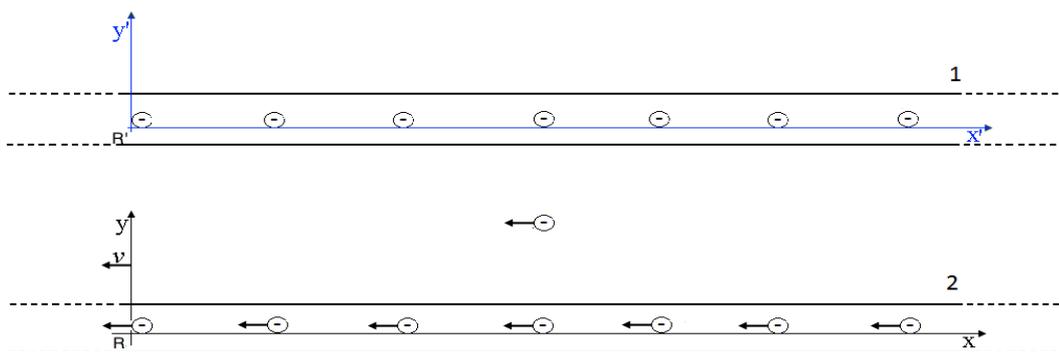
Atribui-se à barra 1 a velocidade $v\hat{i}$ (em relação ao referencial R). Sabe-se que a distância entre duas cargas consecutivas da barra 2 tem comprimento L (mensurada a partir do referencial R , sendo $L = X_2 - X_1$). Sendo assim, quais seriam as forças exercidas sobre uma partícula de prova situada a meia distância entre as barras cujo valor de carga elétrica vale $-e$? E se fossem analisadas, a partir do referencial R' , as forças exercidas sobre a partícula de prova, elas teriam os mesmos valores? Buscarei analisar, primeiramente, a força resultante exercida sobre a partícula de prova tendo R como referencial de análise.

Frente ao referencial R , os elétrons da barra 1 estão em movimento, havendo, então, um campo magnético (\mathbf{B}_1) na região em que se encontra a partícula de prova. No entanto, como esta está parada em relação ao referencial considerado, nenhuma força magnética é exercida. Além disso, como as barras têm a mesma distribuição homogênea de cargas elétricas, ambas geram o mesmo valor de campo elétrico (\mathbf{E}) na região que se encontra a partícula de prova, conseqüentemente, ambas exercem uma força eletrostática (\mathbf{F}_E) de mesma intensidade, mesma direção e sentidos contrários sobre a partícula de prova. Ou seja, a força resultante exercida sobre a partícula de prova neste instante é nula.

Analisaremos agora o mesmo fenômeno a partir do referencial R' .

³ \hat{i} é o vetor unitário na direção x do referencial.

Ilustração 2 – Barras carregadas eletricamente



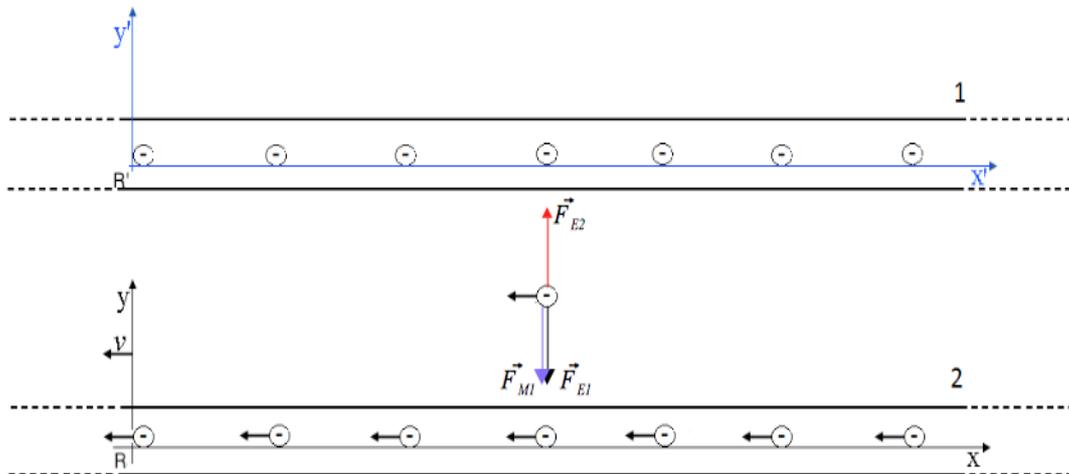
Frente a esse referencial os elétrons da barra 2 estão em movimento, gerando um campo magnético na região que se encontra a partícula de prova. Sobre essa é exercida uma força magnética (F_{B2}) devido ao campo magnético gerado pela barra 2 (B_2) e ao movimento da partícula frente as linhas deste campo, já que ela, frente ao referencial R' , se move com velocidade $-v\hat{i}$.

No entanto, se, assim como quando analisado perante o referencial R , os campos elétricos gerados pelas barras 1 e 2 sobre a partícula de prova tiverem a mesma intensidade, a força resultante sobre a partícula de prova será não nula, pois, além das forças elétricas, há, nessa situação, uma força magnética, o que contrariaria o princípio da relatividade (seja de Galileu ou de Einstein). Isso porque observadores localizados em referenciais inerciais diferentes devem estar de acordo quanto ao fato de que, se a partícula não estiver acelerada para um observador em R , também não estará para um observador em R' . Dessa forma, pode-se pensar em duas possibilidades: ou as leis da Eletrodinâmica (ou Eletromagnetismo) não são válidas em quaisquer referenciais inerciais; ou são válidas e, então, seria necessário modificar as regras de transformações entre referencias, levando a modificações nas escalas de tempo e espaço entre referencias que se movem com alguma velocidade relativa diferente de zero.

Como esse fenômeno de contração do espaço já era conhecido e matematizado por Lorentz, Einstein elabora uma teoria que julga ser coerente essa contração espacial, explicando-a com argumentos físicos. Dessa maneira, a possibilidade das leis da eletrodinâmica serem válidas para os referenciais inerciais torna-se coerente, levando à conclusão de que, mesmo para fenômenos eletrodinâmicos, não há, no conjunto dos referenciais inerciais, um referencial privilegiado. Isso redefine os conceitos mais básicos da

mecânica (espaço e tempo), tornando-os relativos, e não absolutos como na mecânica elaborada por Newton. Haverá, então, contração da barra 2, com aumento da densidade de cargas, aumentando a intensidade do campo elétrico e, conseqüentemente, aumentando a força elétrica exercida sobre a partícula de prova.

Ilustração 3 – Força exercida sobre uma carga de prova



Assim, a força elétrica resultante é igual, em módulo, à força magnética ($F_{E2} - F_{E1} = F_{B2}$). Dessa forma, as leis da eletrodinâmica são válidas em todos os referenciais inerciais, porém o princípio da relatividade válido é o de Einstein. Não apenas as leis da mecânica são válidas para qualquer referencial inercial (como afirmava Galileu), mas todas as leis da Física são válidas para qualquer referencial inercial (segundo o princípio da relatividade de Einstein). Essa diferença representa a passagem da concepção de espaço e do tempo absolutos – para Newton – para o relativismo de Einstein.

4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MECÂNICA RELATIVÍSTICA DE EINSTEIN

Com os avanços da eletrodinâmica e do eletromagnetismo, a mecânica clássica já não podia mais servir como base para a apresentação teórica de todos os fenômenos físicos. Isso porque muitos dos fenômenos da ótica e da eletrodinâmica não podiam ser explicados a partir dos pressupostos formulados por Galileu e por Newton na mecânica clássica. Além disso, outro argumento que enaltece a TRE e restringe a aplicação da mecânica clássica é o de que até hoje não foi comprovada a existência de um referencial privilegiado, tornando indiferente a escolha do referencial inercial para se analisar um determinado fenômeno. Na tentativa de melhor compreender a diferença entre o pensamento newtoniano e o pensamento einsteiniano, em relação aos movimentos e à relatividade, abordo alguns aspectos importantes da TRE.

A lei da propagação da luz e o princípio da relatividade.

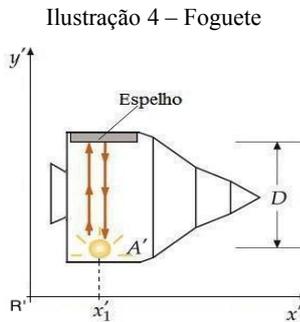
Imaginemos dois sistemas de referência, R e R' . Esse último desloca-se descrevendo um movimento retilíneo e uniforme com velocidade $-v$ em relação a R . Imaginemos também que uma partícula p se mova em uma trajetória retilínea com velocidade constante w em relação a R . Assim sendo, um observador utilizando-se de R mensuraria w como sendo a velocidade da partícula. Caso se utilizasse de R' , o resultado da medida efetuada seria $w + v$.

Esse resultado está de acordo com o teorema da adição das velocidades para a mecânica clássica. Porém, se ao invés de considerar uma partícula, o observador estivesse interessado em mensurar a velocidade de um pulso de luz a partir de cada referencial? Sabe-se que a velocidade de propagação da luz não pode depender da velocidade do movimento da fonte que a emite. A isso constitui-se uma lei, a *lei da propagação da luz*. Sabendo que a velocidade de propagação da luz no vácuo vale c , tem-se, então, a velocidade c para o pulso de luz quando mensurado a partir de R e $c + v$ quando mensurado a partir de R' . Ter-se-ia, então, perante um determinado referencial inercial, a velocidade de propagação da luz maior que c ?

Esse resultado contraria, aparentemente, ou a lei da propagação da luz ou o princípio da relatividade. Na verdade, não existe nenhuma incompatibilidade entre o princípio da relatividade einsteiniana e a lei da propagação da luz. Por adesão a essas duas leis, pode-se chegar a uma teoria revolucionária, a TRE. Porém, nesta, as medidas efetuadas perante os dois referenciais deverão ser iguais a c , diferenciando-se, então, do resultado ao se utilizar da relatividade galileana.

Tomemos outro exemplo: imagine um foguete que se desloca com velocidade próxima a da luz em relação a um referencial. No interior do foguete é emitido um pulso de luz perpendicular à direção do movimento do foguete. O pulso de luz se desloca por uma distância D e é refletido por um espelho plano, fazendo com que ele retorne para o ponto onde foi emitido. Vamos supor que isso acontece num intervalo de tempo em que o foguete passa tangencialmente à superfície da Terra, possibilitando que dois observadores na Terra, assim como um observador a bordo do foguete, observe o fenômeno. Para mensurar a posição, velocidade e tempo, tanto para o pulso de luz quanto para o foguete, são fixados dois referenciais considerados inerciais, um no observador a bordo do foguete (R') e outro no observador que está em repouso em relação a um referencial fixo na superfície terrestre (R). Diante disso, qual o fenômeno observado pela pessoa no foguete e pelos dois observadores na Terra?

Inicialmente, centrar-me-ei em responder a primeira pergunta. Para o observador no foguete, o raio luminoso segue uma trajetória retilínea e de mesma direção, tanto na ida quanto na volta, pois o foguete não se move em relação ao referencial R' .



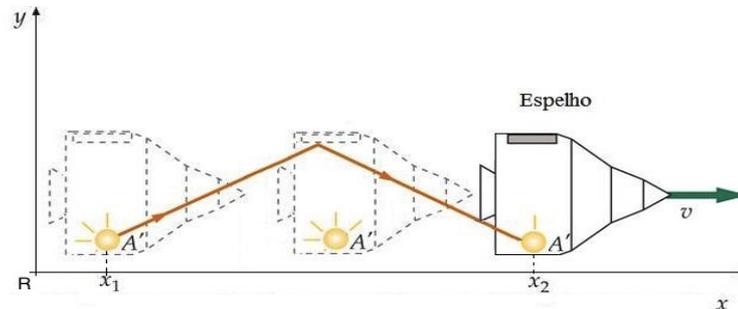
A relação entre a distância D e o tempo transcorrido $\Delta t'$, matematicamente poderia ser expresso da seguinte forma:

$$V \equiv \frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow c = \frac{2D}{\Delta t'} \rightarrow D^2 = \frac{c^2 \cdot \Delta t'^2}{4}$$

Equação 1

Já os observadores solidários ao referencial R (tendo a Terra em repouso), observariam o fenômeno da seguinte forma:

Ilustração 5 – Foguete



Nota-se que, frente ao referencial R, o foguete está em movimento. Dessa forma, os dois observadores solidários a R observariam o foguete com velocidade v . Para o referencial R, os dois eventos – a emissão do pulso e o retorno dele – acontecem em duas posições distintas, sendo necessários, então, dois relógios para se mensurar o tempo transcorrido. Pode-se relacionar a distância D com o tempo transcorrido (agora segundo o referencial R), e obter a seguinte expressão:

$$c^2 = \frac{4}{\Delta t^2} \cdot \left(D^2 + v^2 \cdot \frac{\Delta t^2}{4} \right)$$

Equação 2

Se relacionarmos as equações 1 e 2, podemos retirar uma expressão do tempo transcorrido para um mesmo evento segundo dois referenciais inerciais que se movem, um em relação ao outro, com velocidade constante.

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \Delta t = \delta \cdot \Delta t' \quad \text{sendo} \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Equação 3

Ou seja, o intervalo de tempo $\Delta t'$, medido pelo observador que está no foguete, é diferente do intervalo de tempo Δt medido pelos observadores que estão na Terra. Essa diferença é dada por um fator δ que está relacionado, neste caso, com a velocidade do foguete. Se a velocidade do foguete em relação ao referencial R for aumentada, o mesmo acontecerá com a diferença entre os tempos mensurados. Nota-se, também, que v deve ser menor que c , pois, caso contrário, a solução não seria aceita fisicamente.

Conclui-se, então, que o tempo mensurado a partir de um referencial inercial R não é o mesmo para outro (R') que esteja em movimento em relação a R . Sendo assim, a TRE nos leva à conclusão lógica de que o tempo não é o mesmo em relação a dois referenciais inerciais que se movem um em relação ao outro. O mesmo acontece com o espaço, visto que a distância entre dois objetos em relação a um referencial inercial não é a mesma quando mensurada a partir de outro que se mova com velocidade constante em relação ao primeiro.

Para a TRE, cada referencial possui um sistema métrico e temporal diferente de outro referencial que se move em relação àquele. Utiliza-se, na TRE, a tridimensionalidade espacial e o tempo como uma quarta variável. Assim, para um sistema R , as coordenadas que descrevem o movimento de um objeto podem ser dadas por (x, y, z, t) , enquanto que para um referencial R' pode ser dada por (x', y', z', t') . Como as transformações de Galileu para a adição de velocidades não são mais válidas (isso fica mais evidente quando se trata de analisar fenômenos cujas velocidades se aproximam da luz), Einstein se utiliza das transformações espaço-temporais de Lorentz.

Para chegarmos nessas transformações, imaginemos dois referenciais inerciais, R e R' , dotados de uma velocidade relativa diferente de zero. Suponhamos que em $t = 0$, as origens de R e R' coincidam e que neste instante um pulso de luz é emitido (com início coincidindo, também, nas origens de R e R'). Como a velocidade do pulso de luz deve ser a mesma tanto para R quanto para R' , então as transformações de Galileu não são válidas. Mas vamos admitir que a equação de transformação relativística para x seja a mesma que a equação clássica ($x = x' + v.t$) exceto por uma constante multiplicadora δ . Assim, temos $x = \delta.(x' + v.t')$ e sua inversa $x' = \delta.(x - v.t)$. Os postulados de Einstein exigem que a equação (em x) para a frente de onda do pulso de luz seja $x = c.t$ no referencial R e $x' = c.t'$ no referencial R' . Relacionando as quatro últimas equações, obteremos:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Podemos, com isso, obter as transformações espaço-temporais de Lorentz:

$$x' = \delta \cdot (x - v \cdot t); \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Porém, será que com estas transformações a lei da constância da velocidade da luz é satisfeita? Suponhamos que seja emitido um sinal luminoso ao longo do eixo x positivo de um referencial R e que ele se propague de acordo com a equação:

$$x = c \cdot t$$

Equação 4

Um observador, utilizando-se de um referencial R' que se move com velocidade v em relação ao referencial R , faria as seguintes medidas para a posição (x') e o tempo (t'):

$$x' = \frac{(c - v) \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad e \quad t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Equação 5

Se dividirmos uma equação pela outra teremos como resultado:

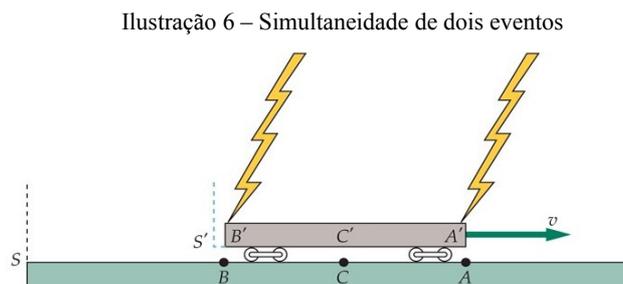
$$x' = c \cdot t'$$

Equação 6

Ao compararmos as equações 4 e 6, conclui-se que o referencial R' também mensura uma velocidade c para a propagação do feixe luminoso. Esse resultado está de acordo tanto com a lei da propagação da luz, quanto com as transformações de Lorentz, ou seja, com a relatividade einsteiniana.

A Relatividade da Simultaneidade

Imagine uma ferrovia muito longa, retilínea, sobre a qual pode se movimentar um longo vagão de trem com velocidade v . Suponhamos que no ponto médio do comprimento do vagão encontra-se uma pessoa C' e que, em repouso no trilho, encontra-se uma pessoa C . Imagine que no exato momento em que a pessoa C' cruza com a pessoa C dois raios, A e B , atingem as extremidades do vagão, conforme a figura abaixo:



Analisando o que acontece após o instante em que os raios atingem as extremidades do trem, temos o desenvolvimento do pulso de luz.

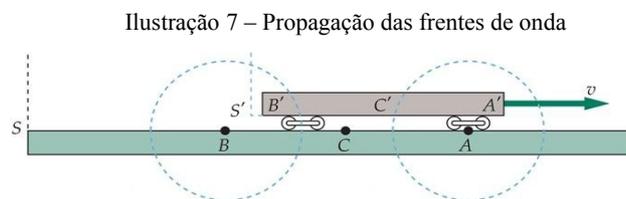
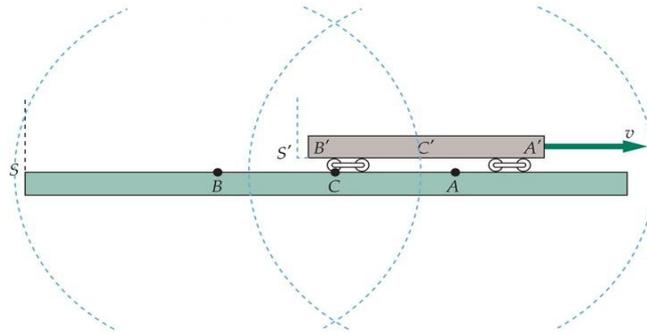


Ilustração 8 – Propagação das frentes de onda



Notemos que no exato instante em que os raios A e B atingem as extremidades do vagão, os observadores C e C' encontram-se equidistantes de ambos os raios. Porém, o observador C' detecta primeiramente o raio B e só posteriormente o raio A. Assim, entende que os eventos (a queda dos dois raios) não foram simultâneos. Porém, o observador C detecta os raios A e B ao mesmo tempo, entendendo que os eventos foram simultâneos. Com isso, concluímos que um dado evento que é simultâneo para um determinado referencial não o é para outro.

Isso põe um problema: se C' detecta o raio B antes que o raio A, poder-se-ia concluir que a velocidade de propagação do raio B foi maior que do raio A. Mas isso contraria a lei da propagação da luz. Então, qual o caminho a ser seguido para responder a tal problema que, ao mesmo tempo, mantenha a validade da lei da propagação luz e do princípio da relatividade? A resposta ao problema aqui levantado muda a história da Física. Para que a lei da propagação da luz e o princípio da relatividade continuem válidos, é necessário repensar os conceitos de tempo e de espaço tidos como absolutos na mecânica clássica newtoniana. Assim, deixam de ser válidas as hipóteses de que tanto o intervalo de tempo entre dois eventos quanto a distância espacial entre dois pontos independe do referencial que se adota – o que é coerente para a mecânica clássica. Logo, é necessário redefinir a adição de velocidades entre dois ou mais referenciais. Repensaremos os conceitos de tempo e de espaço em outro exemplo.

Dilatação do tempo

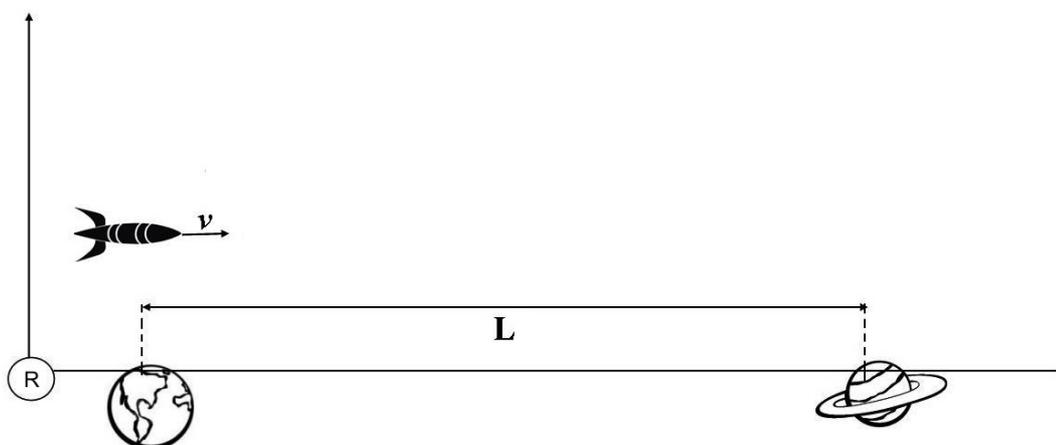
No exemplo do foguete, vimos que o tempo mensurado a partir de um referencial inercial R não é o mesmo para outro (R') que esteja em movimento em relação a R. Sendo assim, a TRE nos leva à conclusão lógica de que o tempo não é o mesmo para dois referenciais inerciais que se movem um em relação ao outro. Tomemos dois referenciais

inerciais, R e R' , sendo v a velocidade relativa deles. Suponhamos que o referencial R' esteja fixo em um foguete que fará uma viagem da Terra a Saturno e que o referencial R esteja fixo na Terra. Assim, quanto tempo terá transcorrido para o foguete efetuar a viagem segundo a mensuração:

- a) para observadores do referencial (R) onde a Terra está em repouso?
- b) para observadores do referencial (R') onde o foguete está em repouso?

Tentarei, a partir deste momento, responder ao problema evidenciado no item *a*. Inicialmente, temos de estar cientes de que o evento acontece, para o referencial R , em dois pontos distintos. Um dos pontos é a Terra e outro é Saturno⁴. Consideremos que a distância entre estes pontos é dada por L , assim:

Ilustração 9 – Espaço relativo



Segundo a TRE, cada referencial deve conter um conjunto de relógios e de réguas, pois as distâncias e os intervalos de tempo mensurados por dois referenciais inerciais, que se movem um em relação ao outro, são diferentes. Pode-se afirmar que um referencial deve possuir, em cada ponto do espaço, um relógio, possibilitando comparar o tempo medido por cada relógio em cada ponto do espaço.

⁴Analisaremos a partir de pontos sobre a superfície da Terra e de Saturno, os quais configuram a distância entre os centros de massa de cada astro.

Se, ao partir, os relógios do referencial onde a Terra está em repouso (R) estiverem sincronizados, pode-se calcular o tempo necessário para que o foguete efetue a viagem Terra-Saturno.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{L}{v}$$

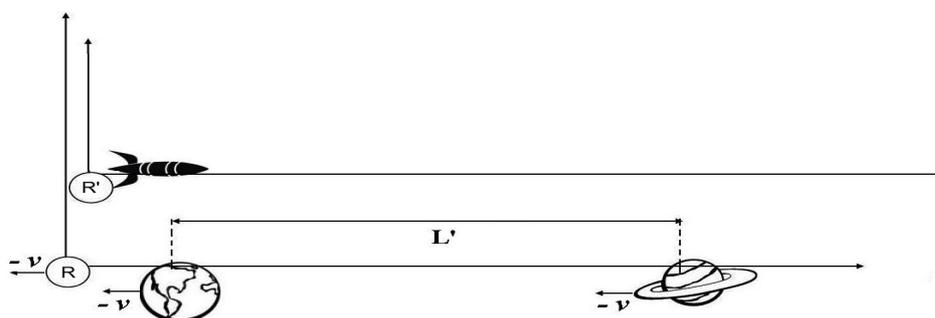
Equação 7

Vamos supor, apenas por constatação numérica, que a velocidade do foguete em relação ao referencial R é $v=0,9c$ e que a distância entre a Terra e Saturno vale $L=1,28 \times 10^{12}m$. Assim, o tempo necessário para a viagem é de aproximadamente:

$$\Delta t = \frac{L}{v} = 79 \text{ min}$$

Procurarei saber agora qual o tempo mensurado pelo astronauta que está em repouso no referencial R'.

Ilustração 10 – Espaço relativo



O referencial R' tem uma característica importante: ele é o único referencial inercial no qual os dois eventos – partida e chegada – ocorrem na mesma posição. Conseqüentemente, ele é o único referencial inercial em que os tempos de ocorrência de ambos os eventos são medidos

pelo mesmo relógio. Esse tempo calculado é o que se chama de *tempo próprio*. Pode-se calcular esse tempo utilizando as transformações de Lorentz. Utilizando a equação 3, temos:

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow \Delta t' = 34,5 \text{ min}$$

Lembramos que para observadores solidários ao referencial R, o tempo de viagem do foguete teve duração de 79 minutos. Já para o astronauta, em repouso em relação ao referencial R', ao chegar a seu destino (Saturno), calcula que a duração da viagem foi de 34 minutos e 30 segundos. Novamente, conclui-se que a duração de um fenômeno, mensurada a partir de um referencial inercial R, não é a mesma quando mensurada a partir de outro referencial inercial R' que se move em relação a R.

Contração do espaço

De acordo com a TRE, a distância entre dois objetos em relação a um referencial inercial não é a mesma quando mensurada a partir de outro que se mova com velocidade constante em relação ao primeiro. Analisando a ilustração 9, evidencia-se que a distância entre a Terra e Saturno vale L (sendo L aproximadamente igual a $1,28 \times 10^{12}$ m). Essa distância é medida a partir do referencial R, no qual os centros de massa dos objetos (Terra e Saturno) estão em repouso. Por esse motivo, dizemos que a distância L é a *distância própria*.

No entanto, analisando a ilustração 10 (situação na qual se observa a partir do referencial R'), a medida entre a Terra e Saturno é L'. Pode-se demonstrar que $L' < L$ utilizando a equação 5 para relacionar dois pontos (x'_1, x'_2) do referencial R' com dois pontos (x_1, x_2) do referencial R:

$$x'_1 = \delta \cdot (x_1 - v \cdot t)$$

Equação 8

$$x'_2 = \delta \cdot (x_2 - v \cdot t)$$

Equação 9

Subtraindo a equação 9 e a equação 8, tem-se:

$$L_p = \delta \cdot L'$$
$$L' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot L_p$$

Equação 10

Atribuindo valores numéricos à equação 10, tem-se que a distância mensurada a partir do referencial R' entre a Terra e Saturno vale $0,558 \times 10^{12}$ m. Nota-se que esse valor é menor do que a distância própria ($L = 1,28 \times 10^{12}$ m), ou seja, a mensurada pelo referencial em que os centros de massa dos objetos estão em repouso.

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A EPISTEMOLOGIA GENÉTICA

Retomarei, neste momento, alguns trabalhos importantes da Epistemologia Genética de Jean Piaget que, a meu ver, dão maior clareza aos meus objetivos e minhas pretensões. Para isso, explorarei a noção de espaço investigada por Piaget, comparando-a com o desenvolvimento científico humano. Buscarei fazer o mesmo com a noção de tempo e, por fim, explicitar o aporte teórico que utilizarei para explicar os dados que serão coletados na pesquisa.

5.1. NOÇÃO DE ESPAÇO

Em relação à constituição do espaço na criança, Piaget e Inhelder (1993, p. 93) afirmam que

[...] o espaço geométrico não é um puro decalque do espaço físico construído ao mesmo tempo que ele e ao qual corresponde, há muito, termo a termo: a abstração da forma é uma verdadeira reconstrução daquele, a partir das ações próprias e do espaço sensório-motor depois mental e representativo, determinado pelas coordenações dessas ações.

A constituição do espaço pela criança não é simplesmente resultado de uma leitura das propriedades dos objetos físicos. É, antes, desde o início, resultado da ação do sujeito sobre estes objetos, retirando da coordenação de suas ações as relações topológicas. Essa ação constitui, correlativamente, a realidade física concebida pelo sujeito e o próprio sujeito em si, no sentido que ambos se enriquecem na interação. Ao invés de extrair do meio externo estruturas já formadas, ele as constrói e é somente por isso que consegue superar o real, constituindo, gradativamente, os esquemas operatórios suscetíveis de serem formalizados e de, no plano do desenvolvimento, funcionarem dedutivamente, descolados dos conteúdos que lhe deram origem.

Sobre o papel da experiência na constituição do espaço pela criança e a importância do conceito de ação na Epistemologia Genética, Piaget e Inhelder (1993, p. 474) são esclarecedores ao afirmar que

A geometria da criança é experimental antes de ser dedutiva, mas nem toda experiência é uma experiência de física. As experiências iniciais que o espaço engendra são, com efeito, sobretudo experiências feitas pelo sujeito sobre suas próprias ações, e consistem em determinar em como essas ações encadeiam-se umas nas outras.

É evidente, no entanto, que a ação sobre os objetos físicos é de extrema importância, porém não é da leitura dos resultados que a criança constrói a noção de espaço. Além dos conhecimentos adquiridos sobre os objetos físicos, é abstraindo caracteres das coordenações das ações que, inicialmente, as relações topológicas, depois as projetivas e euclidianas, se constituem, exigindo do sujeito um número crescente de coordenações entre as ações cada vez mais complexas. Essas coordenações possibilitam abstrair propriedades que não estão no meio físico ou social, mas são constituídas pela própria atividade do sujeito.

Referente ao espaço topológico, Piaget e Inhelder (1993, p. 488) explicam que este se constitui por uma

[...] reunião contínua de elementos, deformáveis por estiramentos ou contrações, e que não conserva retas, distâncias ou ângulos, etc: essas noções topológicas não chegam, pois, à construção de um sistema de figuras estáveis ou de relações entre figuras, tal como um sistema de coordenadas que determinam as posições relativas e as distâncias, ou como um sistema de projetividades que determinam as posições e as formas em relação a um conjunto de planos ou de pontos de vista. Cada domínio contínuo constitui um espaço e nenhum espaço geral é ainda dado a título de enquadre dos objetos e das formas que permitem situá-los uns em relação aos outros.

Diferentemente das relações topológicas elementares, as noções projetivas implicam coordenação das figuras entre si em um sistema que relaciona os pontos de vista de observadores. Piaget e Inhelder (1993, p. 489) caracterizam “[...] a geometria projetiva como geometria dos pontos de vista, ficando entendido que ela supõe a construção prévia das relações topológicas e que as conserva se acrescentando a elas”. Essas coordenações dos pontos de vista engendram, gradualmente, uma coordenação dos objetos. Tal coordenação conduzirá ao espaço euclidiano que, por sua vez, conservando as distâncias, constituirá os sistemas de referências. Dessa forma, “o sistema de coordenadas não está, com efeito, no ponto de partida do conhecimento espacial, mas no ponto de chegada da construção psicológica inteira do espaço euclidiano [...]” (PIAGET & INHELDER, 1993, p. 435).

No entanto, é importante salientar que não poderia existir um ponto de vista consciente em seu estado isolado. Para ser constituído como um ponto de vista, este deve

estar inserido num conjunto de relações dentro de uma totalidade, isso é, de um sistema capaz de coordená-lo com outros pontos de vista. Como afirma Piaget e Inhelder (1993, p. 256), “[...] é somente quando consegue reconstituir o ponto de vista dos outros observadores que a criança descobre o seu próprio e por isso a descoberta da perspectiva é tão difícil de realizar no caso da relação entre os objetos e o sujeito quanto entre os mesmos objetos e o outro”.

A representação do espaço pela criança exige a reconstrução deste a partir das intuições mais elementares (relações topológicas de vizinhança, de separação, de ordem, de circunscrição e de continuidade). Para poder representar o espaço, a criança deve ser capaz de reconstruir essas intuições, assim como suas relações, no plano do pensamento. Dessa forma, “pode-se compreender, então, que a representação espacial é uma ação interiorizada e não simplesmente a imaginação de um dado exterior qualquer, resultado de uma ação” (PIAGET & INHELDER, 1993, p. 474).

A construção do espaço euclidiano exige, por sua vez, algo que vai muito além da percepção visual correta. Isso porque não é do meio externo que se retiram as formas elementares do espaço, muito menos o conceito de espaço euclidiano. Exige-se, pelo contrário, um vasto e complexo jogo de coordenações de ações para que, destas, abstraiam-se as formas capazes de constituir o pensamento necessário para a construção do espaço euclidiano.

[...] a 'abstração das formas' não se realiza a partir apenas dos objetos percebidos como tais, mas bem mais a partir das condições da ação que permitem reconstruir tais objetos em sua estrutura espacial. É por isso que as primeiras formas assim abstraídas são de caráter topológico e não euclidiano, pois as relações topológicas exprimem as coordenações mais simples de regulação entre os elementos motores dissociados do ritmo primitivo em oposição às coordenações necessárias às formas euclidianas que suportam regulações mais complexas (PIAGET & INHELDER, 1993, p. 84).

As coordenadas do espaço euclidiano são constituídas por uma vasta rede estendida a todos os objetos, consistindo em relações de ordem aplicadas às três dimensões. Apesar de se diferenciar o espaço euclidiano do espaço projetivo, constata-se que ambas construções são solidárias, já que, psicologicamente, é na medida em que o sujeito coordena os pontos de vista (construindo as relações projetivas) que ele consegue coordenar os objetos e as distâncias entre eles, construindo as relações tridimensionais euclidianas.

O espaço tridimensional euclidiano, do qual se utiliza Newton, como um conceito fundamental da sua mecânica clássica, é considerado por ele como homogêneo e absoluto. Porém, Einstein (*apud* JAMMER, 2010, p. 216), frente a problemas principalmente relacionados à eletrodinâmica, coloca em discussão os conceitos básicos de espaço e tempo.

Perdoe-me Newton; você descobriu o único caminho que, em sua época, era possível para um homem do mais alto intelecto e capacidade criativa. Os conceitos que você criou continuam a nortear o nosso pensamento em física, embora hoje saibamos que terão de ser substituídos por outros, mais afastados da esfera da experiência imediata, se almejarmos compreender mais profundamente as relações entre as coisas.

Ao falar dos conceitos criados por Newton, Einstein certamente quis envolver, além de outros, os conceitos de espaço e de tempo, já que para a elaboração da Mecânica Newtoniana foi necessária a interpretação de um espaço e de um tempo absolutos. O que podemos concluir dessa citação de Einstein é que os conceitos evoluem na medida em que são postos à prova frente a uma realidade física. Os conceitos de espaço e tempo, aceitos pelos adeptos da mecânica clássica newtoniana, já não mais se sustentam diante dos novos problemas, postos e discutidos em *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento* (2005a), de Einstein.

Sabia-se há muito tempo que todo corpo em movimento em relação ao espaço absoluto experimentava certa contração na direção do movimento. Isso já fora matematizado por Lorentz, mas somente Einstein formulou uma explicação física para o fenômeno. Poincaré (2010, p. 93), por sua vez, afirma que “whoever speaks of absolute space uses a word devoid of meaning”⁵. E isso se provou verdadeiro quando inúmeras tentativas de se detectar o éter luminífero falharam (uma das principais tentativas a respeito foi a experiência de Michelson-Morley).

Entretanto, a tentativa de detectar o éter luminífero, e assim comprovar o espaço absoluto, mostra que o espaço tem existência física ou seria uma tentativa de demonstrar na prática uma criação humana? A busca de uma resposta a essa questão serve de motivação para seguir em frente na constituição do espaço aceito pela ciência atual.

Riemann, em sua obra intitulada *Sobre as hipóteses que servem de fundamento à geometria* (1988), apoia-se sobre a geometria de grandezas infinitesimalmente pequenas

⁵ “Quem fala em espaço absoluto usa uma palavra desprovida de sentido” (Tradução nossa)

relacionando-as com o princípio da continuidade de Leibniz, mostrando a importância para o fato de que todas as leis deveriam ser formuladas como leis de campo. Dessa forma, as leis que buscam explicar os fenômenos físicos por uma interpretação de forças à distância deve ser descartada, sugerindo-se a adoção do campo como conceito básico de qualquer teoria. Essa ideia esteve presente e foi concluída com a aceitação da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, na qual o sistema inercial foi substituído pelo campo de deslocamento, um componente do campo total.

Da mesma forma que na natureza não existe um campo magnético ou elétrico homogêneo, um campo métrico espacial homogêneo também seria uma idealização. Como a estrutura física dos campos magnético e elétrico dependem da distribuição, respectivamente, dos polos magnéticos e das cargas elétricas, o campo métrico espacial dependeria da distribuição da matéria. Essa ideia se mostra eficaz com o aceite da Teoria da Gravitação de Einstein, na qual a estrutura métrica, determinada pelo tensor einsteiniano $R_{\mu\nu}$, relaciona-se em todos os pontos do *continuum* espaço-temporal com o tensor de energia-massa $T_{\mu\nu}$ pelas equações de campo.

O campo total é o único meio de descrever o mundo real. O aspecto espacial das coisas reais fica completamente representado por um campo que depende de quatro parâmetros coordenados; é a qualidade desse campo. Se retirarmos o campo, não permanecerá nenhum 'espaço', pois o espaço não tem existência independente (EINSTEIN, 1953, p. 163).

Os “quatro parâmetros” que Einstein menciona são os mesmos utilizados nas transformações de Lorentz, três parâmetros espaciais (x, y e z) e um temporal (t) que, relacionados, forma o *continuum* espaço-temporal. Desse modo, “a geometria euclidiana deve dar lugar à geometria riemanniana. Por conseguinte, está claro que, na Física, em última análise, a estrutura do espaço não é nada que seja dado na natureza ou que independa do pensamento humano. Ela decorre do nosso esquema conceitual” (JAMMER, 2010, p. 216).

5.2. NOÇÃO DE TEMPO

O prefácio da obra *A noção de tempo na criança* (PIAGET, 2002) começa com a seguinte frase: “esta obra nasceu de uma sugestão que Albert Einstein nos fez [...]” (PIAGET, 2002, p.7). A meu ver, não haveria autor de maior prestígio que o elaborador de uma teoria

que relativizou os conceitos de espaço e de tempo para propor tal desafio a Piaget. Nessa obra, Piaget afirma, como resultado de várias pesquisas, que a criança constrói a noção de tempo na medida em que consegue coordenar movimentos de diferentes velocidades.

Dado o movimento de um objeto com velocidade constante (frente a um referencial inercial) sobre um caminho retilíneo proveniente da ligação de três pontos equidistantes (A, B e C), a criança sabe desde muito cedo que para o objeto percorrer o percurso AB é necessário um tempo menor do que para o percurso AC. No entanto, nada pode ser afirmado se o êxito foi proveniente de uma noção de tempo ou de uma noção de espaço, visto que o percurso AB tem comprimento menor que AC. Isso porque para a criança pré-operatória, a ordem temporal se confunde com a ordem espacial, e a duração temporal com o caminho percorrido. Dessa forma, analisando apenas um trajeto ABC não é possível concluir uma noção de tempo independente da noção espacial. Para isso, como fez Piaget em suas pesquisas, é necessário relacionar dois caminhos (ABC e A'B'C'), com seus respectivos comprimentos, cujos movimentos (de dois objetos que percorrerão tais caminhos) tenham velocidades diferentes.

Ao comparar dois movimentos com velocidades diferentes que iniciam e terminam no mesmo instante, a criança pré-operatória julga que não há simultaneidade temporal de término dos movimentos, visto que o deslocamento de cada um é diferente. Ou seja, a própria simultaneidade é negada quando não há coincidência nos pontos espaciais de chegada, novamente retratando a indiferenciação entre tempo e espaço na criança pré-operatória. Essa dificuldade somente é superada quando a criança, por interiorização de suas ações, consegue diferenciar tempo e espaço, o que exige dela uma construção ontogenética laboriosa e gradual, pois “a tradução da sucessão no tempo em uma sequência linear não é uma coisa que se impunha por si, necessariamente; mas, ao contrário, pressupõe a unicidade do tempo, isto é, a possibilidade de ligar todas as relações de 'antes' e de 'depois' em uma série temporal” (PIAGET, 2002, p.24). Ou ainda, quando a criança passa a relacionar a duração temporal de dois ou mais movimentos como sendo homogênea, em oposição ao tempo local antes considerado pela criança como tendo cada movimento uma métrica temporal própria, podemos entender que ela construiu uma noção de tempo desvinculada do espaço.

Entretanto, coordenar movimentos de velocidades diferentes requer alguma noção de velocidade e de movimento como ponto de partida. O problema é que tais noções não são dadas *a priori*, mas, sim, construídas pela criança. Isso é nítido, por exemplo, na noção de velocidade na criança pequena. Enquanto o tempo não está constituído, a velocidade fica

relacionada à ultrapassagem ou ao fato de um objeto estar à frente do outro. Não há ainda uma relação entre a distância percorrida e o intervalo de tempo necessário para efetuar tal trajeto, visto que espaço e tempo são indiferenciados.

Outra investigação realizada por Piaget (2002) sobre a relação tempo-espaço busca compreender como as crianças relacionam idade com tamanho. Um exemplo interessante: a criança pré-operatória, ao observar duas árvores de tamanhos diferentes, julga que a maior é a “mais velha”. Ou ainda, quando afirmamos que a pessoa A nasceu antes que a pessoa B, mas esta, com o passar dos anos, supera A em tamanho, as crianças pequenas não veem contradição alguma em afirmar que B é a “mais velha”. Ou seja, a criança ainda não relaciona a idade com a data de nascimento por falta de coordenação do passado com o presente.

Compreender o tempo é libertar-se do presente: não apenas antecipar o futuro em função das regularidades inconscientemente estabelecidas no passado, mas desenvolver uma sequência de estados, nenhum dos quais é semelhante aos outros, e cuja conexão não se poderia estabelecer senão mediante um movimento progressivo, sem fixação nem repouso. Compreender o tempo é então transcender o espaço mediante um esforço móvel. É essencialmente um exercício de reversibilidade. (PIAGET, 2002, p.430)

Essa reversibilidade do tempo é necessária para a compreensão das relações do passado com o presente, de antecipação, inferência e planejamento do futuro. Mas o tempo, assim como o espaço, é simplesmente uma criação humana ou existe independentemente do sujeito? Newton, na obra *Princípios matemáticos da filosofia natural*, retrata assim o tempo:

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração; o tempo relativo, aparente e comum é alguma medida de duração perceptível e externa que é obtida através do movimento [...] (2012 p. 45).

No entanto, a mecânica clássica de Newton não possibilita diferenciar passado e futuro. Somente com a termodinâmica consegue-se inferir a existência de um único sentido para o tempo (sentido do passado para o futuro). Para a termodinâmica, existe uma grandeza física chamada entropia que, em todo processo físico, aumenta ou, no mínimo, permanecer constante. Se a entropia aumenta, o processo é irreversível. Dessa forma, tem-se como distinguir o passado do futuro: o futuro é o sentido do tempo em que a entropia aumenta.

Na TRE, tem-se novamente um confronto entre movimento e tempo. Por vezes, a TRE é criticada por desempenhar um papel teórico na propagação da luz, baseando o conceito de tempo na lei da propagação da luz.

Para dar significado físico ao conceito de tempo, algum processo tem que ser utilizado para permitir estabelecer relações entre lugares diferentes. É indiferente o processo escolhido, mas o que a teoria exige é que se escolha um sobre o qual tenhamos dados seguros. É a este requisito que satisfaz a propagação da luz no vazio. Num mais alto nível do que qualquer outro processo físico, graças às investigações de Maxwell e H. A. Lorentz. (EINSTEIN, 1921, p. 16)

Segundo a TRE, afirmar que o tempo é relativo significa dizer que um intervalo de tempo transcorrido entre dois eventos só tem sentido diante de um referencial. Assim, a simultaneidade é um conceito relativo, ou seja, se dois eventos são simultâneos para um referencial, não são para outro que esteja em movimento relativo com o primeiro. Isso implica que o passado e o futuro, na relatividade, não só estão separados por um intervalo de tempo finito como, também, a duração desse intervalo dependerá da distância espacial entre o evento e o referencial.

Mas, afinal, o que podemos afirmar sobre o tempo? Ele teve um início? Se sim, terá um fim? Podemos considerar que o tempo teve início com o Big Bang, ou como diz Weinberg (2002, p.166)

[...] apesar de não sabermos se este instante existiu realmente, é pelo menos logicamente possível que tenha havido um começo e que o próprio tempo não tivesse nenhum significado antes dele. [...] podemos ter de nos habituar à idéia de um zero absoluto de tempo — um instante no passado, para além do qual é, por princípio, impossível imaginar um elo entre causas e efeitos. A questão permanece em aberto talvez para sempre.

5.3. ABSTRAÇÃO REFLEXIONANTE

Em 1977, foi publicada uma das últimas obras em vida de Jean Piaget intitulada *Abstração Reflexionante: relações lógico-matemáticas e ordem das relações espaciais*. Nesta obra, Piaget e seus colaboradores formulam uma teoria do desenvolvimento cognitivo que, de certa forma, engloba o próprio processo de equilibração. Como enunciado na contracapa do referido livro, “a teoria da abstração abre caminho para fundamentar, possivelmente a mais

avançada teoria da aprendizagem humana” (PIAGET, 1977), o que mostra o poder desta teoria para a compreensão dos aspectos cognitivos relacionados à aprendizagem e ao desenvolvimento cognitivo.

Lembro-me muito bem de uma situação ocorrida comigo, enquanto professor de Física, ao ensinar unidades de medida para um aluno do ensino médio. Ele não conseguia compreender a relação entre centímetros e metros. Então, indaguei-o sobre as palavras centímetro e metro, perguntando se havia alguma relação entre elas. Respondeu-me que a palavra centímetro incluía, em sua escrita, a palavra metro, dando a entender uma divisão da palavra centímetro em centi + metro. Questionei-o sobre o prefixo centi e obtive a seguinte resposta: “me faz lembrar da quantidade cem. É por isso que 1 metro tem 100 centímetros?”. Respondi afirmativamente e no momento seguinte, sem qualquer interferência minha, ele conclui: “Então 1 metro tem 1000 milímetros. E 1 metro tem 10 decímetros”.

O mais interessante não é ele ter aprendido a relação entre metro e centímetro, mas o que o aluno fez para aprender e com o que ele aprendeu. O aluno construiu uma nova forma que serviu não apenas para relacionar metros e centímetros, mas para qualquer outro fator de conversão (metro x decímetro, metro x milímetros...). Nota-se claramente que essa forma não pode ser ensinada (o que não exime o trabalho do docente), mas deve ser construída pelo aluno. A abstração reflexionante explica tal construção, evidenciando o papel da ação do sujeito e centrando nela sua explicação. Ao se falar de abstração reflexionante não podemos compreendê-la de outra forma senão como um processo. Esse processo comporta sempre dois aspectos inseparáveis: o reflexionamento que consiste em projetar sobre um patamar $n+1$ aquilo que foi tirado de um patamar n ; a reflexão, caracterizada como ato mental de reconstrução e de reorganização do patamar $n+1$ daquilo que foi transferido do patamar n .

No exemplo anterior (do aluno que aprendera a relação entre as unidades de medida metro e centímetro), fica clara a necessidade desses dois movimentos (reflexionamento e reflexão) para a construção de uma forma. Ele projeta caracteres de uma dada situação sobre um novo patamar e o reconstrói na medida que busca relacioná-la e aplicá-la para outras situações (relação entre metro e milímetro, metro e decímetro, etc). E disso surge uma novidade. É evidente que esta não é uma novidade para o meio científico, mas uma novidade para o indivíduo que está construindo sua realidade. Afinal, como poderia haver novidade no meio científico sem, primeiramente, uma construção individual? Isso ressalta uma forma de

criação das novidades, sejam essas elaboradas por um aluno do ensino médio ou por um físico quântico.

Na evolução do pensamento, é flagrante o papel da experimentação, seja esta física ou lógico-matemática. Estando o sujeito imerso em um meio físico e social, não se poderia falar de processo estruturante sem a contribuição das propriedades que são retiradas, por intermédio da ação, do meio externo ao sujeito. Prova disso é o esforço da comunidade científica em se criar um acelerador de partículas como o LHC (Large Hadron Collider). Situado na periferia da cidade de Genebra, é formado por um tubo com circunferência de 26,7 km, 7 m de diâmetro e construído a 100 m da superfície. Levou 20 anos para ser construído e custou em torno de 10 bilhões de dólares. Tudo isso para que? Para que cientistas pudessem testar suas teorias e coletar dados antes nunca revelados. Nada mais parece tão claro que o LHC para mostrar a importância da experimentação. O pensamento operatório formal capacita o sujeito a elaborar teorias sobre os temas mais variados possíveis. Mas de nada valeriam as teorias se elas não correspondessem à realidade, descrevendo-a e explicando-a.

Por isso Piaget evidencia o processo pelo qual o sujeito “[...] tira suas informações dos objetos como tais, ou das ações do sujeito sobre suas características materiais” (PIAGET, 1995, p. 274), chamando-o de abstração empírica. No entanto, se o sujeito assimila do objeto de conhecimento o que ele tem condições de assimilar, pode-se entender que a abstração empírica depende da abstração reflexionante, visto que ela é construtora de formas e de novidades relativas aos processos cognitivos. Ao mesmo tempo em que se mostra uma diferença entre as abstrações, reflexionante e empírica, há um paralelismo no sentido de que sem um processo que possibilite retirar informações dos objetos como tais, não seria possível a construção de formas cada vez mais equilibradas e condizentes com a realidade física. São essas formas que tendem sempre a um nível de maior generalização, possibilitando abstrair cada vez mais propriedades dos objetos até então não assimiláveis, logo não tidas como existentes. Além do mais, o objeto de conhecimento também é ativo, ao exercer resistência a sua assimilação pelo sujeito. Dessa forma, a assimilação de características do objeto é limitada pelo poder de seu sistema cognitivo. Quando um esquema de assimilação é percebido como insuficiente, o sujeito volta-se para si, produzindo transformações em seus esquemas, acomodando-os às novas características. O esquema refeito por acomodação pode então expandir os limites da abstração, potencializando seu sistema cognitivo no sentido de poder

realizar abstrações (sejam estas empíricas ou reflexionantes) cada vez mais numerosas e complexas.

O primeiro resultado das abstrações reflexionantes é, portanto, acarretar, seja a diferenciação de um esquema de coordenação para aplicá-lo de maneira nova, o que aumenta os poderes do sujeito, seja a 'objetivação' de um processo coordenador que se torna, então, objeto de representação ou de pensamento, o que aumenta os conhecimentos do sujeito, alargando o campo de sua consciência e enriquecendo, portanto, sua conceituação (PIAGET, 1995, p. 278).

Quando o sujeito, ao analisar dois objetos físicos, tira deles propriedades como “este é maior que aquele”, ou “este é mais pesado que aquele” ou quando uma criança brinca com uma garrafa plástica, feita para comportar água, usando-a como um avião, tem-se situações em que as propriedades que são retiradas dos objetos não estão contidos neles, mas são enriquecidos pela ação do sujeito/criança. Quando o objeto de conhecimento é modificado pelas ações do sujeito e enriquecido por propriedades tiradas das coordenações das ações, a abstração apoiada sobre tais propriedades é chamada de abstração pseudo-empírica. Essa abstração é um caso particular da abstração reflexionante, pois as propriedades tiradas dos objetos físicos não são inerentes aos objetos; são colocadas neles pelo sujeito. Na análise de dados veremos o quão importante é termos em mente o processo de abstração pseudo-empírica. Em muitos momentos os sujeitos desta pesquisa retiraram informações que não estavam nas situações ou nos objetos que compunham o método de coleta de dados; eles foram enriquecidos pelas ações dos sujeitos.

No caso do sujeito ter um sistema cognitivo capaz de assimilar novos observáveis relacionados, por exemplo, à TRE, tais fatos novos podem contradizer um modelo explicativo já compreendido pelo sujeito (por exemplo, a Mecânica Newtoniana). Isso se mostra coerente ao pensarmos em uma transposição de estruturas de um patamar n ao patamar $n+1$, pois esse processo é fonte de múltiplos desequilíbrios devido às novas dimensões a considerar, exigindo, assim, novas acomodações. Ao perceber os desequilíbrios e as contradições, o sujeito busca resolvê-los, afinal “A tendência do pensamento que consiste em eliminar e superar as contradições associa-se a busca permanente de uma coerência, exigência esta do pensamento que visa à consciência interna de um sistema epistêmico ou interpretativo bem como o acordo com a realidade.” (DOMINGUES, 1992, p. 155). Neste caso, o modelo pode não ser eliminado, mas perde sua generalidade, tornando-se um caso particular deste novo conjunto de observáveis.

5.4. MODELOS DESCRITIVOS E EXPLICATIVOS NA FÍSICA

Tendo como base a Epistemologia Genética de Jean Piaget, qualquer conhecimento, enquanto capacidade ou estrutura, é oriundo da interação entre sujeito e objeto de conhecimento. Essa interação, por sua vez, só pode ser compreendida com as transformações da ação do sujeito e da ação do objeto. A condição *sine qua non* da ação do sujeito é a existência de um sistema cognitivo, por mais primitivo que seja. Se há a possibilidade do sujeito se desenvolver cognitivamente, isso só é possível devido à sua ação. No entanto, se quisermos compreender o conceito de interação em Piaget, é de fundamental importância analisarmos o papel ativo do objeto de conhecimento.

Explicar os fenômenos físicos exige levar em conta, além do emprego das operações cognitivas, as respostas do objeto de conhecimento que se busca compreender. Falar de explicação supõe que o objeto a ser compreendido existe antes da ação do sujeito mas que somente é compreendido pela ação desse. A teoria da gravitação universal de Newton, por exemplo, não existe na realidade física, mas é algo elaborado pela ação do sujeito para dar conta de uma realidade que independe da ação do sujeito.

Pode parecer natural e muito simples para um sujeito assimilar determinadas informações de objetos físicos. Tomemos como exemplo uma garrafa de água. Algumas características se sobressaem em nossa primeira ação de olhar a garrafa: é transparente; tem uma tampa; a tampa é de determinada cor; possui um rótulo; foi feita para conter água. Esta simples ação de olhar, na verdade, se torna muito mais complexa quando analisamos os sistemas operatórios necessários para se conseguir abstrair tais características. Por exemplo, afirmar que a tampa da garrafa é de tal cor exige que o sujeito conheça uma gama de cores, conseguindo diferenciá-las e classificá-las. Mas como saber se a garrafa é, por exemplo, flexível? A simples ação de olhar não nos fornece tal informação. Será necessária, então, uma ação capaz de assimilar tal informação. O sujeito, então, pode agarrar, apertar, amassar, possibilitando chegar a alguma conclusão sobre a flexibilidade da garrafa. Nota-se que o sujeito dispõe de uma gama de ações que pode realizar, mas deve antecipar e elencar uma, ou algumas, para atingir tal objetivo. O sujeito, então, poderia redefinir a garrafa de água como: transparente; tem tampa; a tampa é de determinada cor; possui rótulo; foi feita para conter água; e é flexível. Essa última característica modifica o que o sujeito considera ser aquela garrafa. E essa modificação só foi possível graças à ação do sujeito, visto que o objeto resiste

à assimilação de suas características. Caso não houvesse essa resistência, não seria necessária uma outra ação do sujeito. O sujeito, então, agiria de uma forma e todas as características do objeto seriam por ele assimiladas.

A assimilação das informações abstraídas dos objetos e a acomodação dos esquemas assimiladores que, com suas relações, compõem um sistema, visam dar um significado para tais informações e enriquecer – quantitativa e qualitativamente – o objeto. Segundo Ramozzi-Chiarotino (1988, p. 25), “todo conhecimento, em qualquer nível, desde o mais elementar, como nos primeiros dias e meses de vida, até o nível da Física, consiste em assimilar o objeto do conhecimento, qualquer que seja ele, a uma estrutura, conferindo-lhe então significado”. O conhecimento, “necessário e universal ou não, implica uma estruturação lógico-matemática a nível de sistema que, por sua vez, implica significado. Assim, todo o conhecimento necessário e universal implica sistemas de significação [que, por sua vez, são] sistemas construídos pelos indivíduos e pelos grupos sociais e culturais, aparentemente juntando apenas conteúdos, através de relações lógicas que expressam o funcionamento da razão humana” (RAMOZZI-CHIAROTINO, 1988, p. 34).

Na Física, esses sistemas de significação têm como consequência a elaboração de modelos da realidade. Esses modelos são hipóteses relativas a uma realidade física, observável ou não, elaborados a partir dos efeitos produzidos por aquela realidade. Esses modelos elaborados pelos sujeitos carregam consigo os conteúdos relacionados à realidade física assim como os sistemas lógicos do sujeito epistêmico. Voltamos, assim, à relação entre os sistemas cognitivos do sujeito e o objeto de conhecimento que se busca assimilar, culminando na elaboração de modelos da realidade.

Entende-se que esses modelos podem visar à descrição ou à explicação dos fenômenos da realidade física. No entanto, essa diferenciação, entre modelos descritivos e explicativos, só faz sentido aos olhos do epistemólogo que, de posse de seus objetivos, consegue diferenciar, por meio da análise operatória do sujeito frente aos conteúdos, se um modelo é considerado descritivo ou explicativo. Para o sujeito, a assimilação de caracteres do objeto de conhecimento visa sempre a dar significado a uma situação e tende a um estado de maior adequação do seu modelo à realidade. Se não houver tomada de consciência dos resultados dessa adequação, o modelo estará fadado a apenas descrever os fatos obtidos. O que não impede de o sujeito elaborar hipóteses na medida em que busca generalizar a adequação do

seu modelo às mais diversas situações. Porém, falaremos, neste caso, de uma generalização indutiva que tende a aumentar a extensão do modelo, e não a sua compreensão.

É evidente, por sua vez, que os modelos descritivos têm fundamental importância. Não se consegue compreender um fenômeno sem que saibamos, primeiro, descrevê-lo. A descrição do fenômeno é necessária para sua posterior explicação. Isso significa que os modelos descritivos são a condição necessária, mas não suficiente, para a elaboração de modelos explicativos. Se analisarmos a história das ciências veremos, por exemplo, que as três leis de Kepler buscam descrever os movimentos dos corpos celestes, na medida em que, baseando-se em observações muito precisas, conseguem descrever e prever determinados movimentos. Da mesma forma, apesar de grandes avanços, Newton, ao elaborar a teoria da gravitação universal, matematiza a relação de ação mútua entre dois corpos massivos que, apesar de sua enorme importância, acabam por descrever essa relação, mas sem explicar. Somente Einstein, com a teoria da relatividade geral, abandonando a ideia de força e adotando a ideia de campo, culmina com a explicação da atração gravitacional por meio da deformação espaço-temporal criada por corpos massivos.

Vê-se uma clara evolução dos modelos elaborados por Kepler, Newton e Einstein, respectivamente. Evolução no sentido de que o modelo de Einstein visa a: primeiramente, explicar o porquê dos fenômenos acontecerem da maneira como acontecem (ou seja, é elaborado levando-se em consideração as causas dos fenômenos); e é mais geral por englobar e explicar os fenômenos descritos pelos modelos precedentes. Ao mesmo tempo em que o novo modelo é enriquecido em compreensão, o é também em extensão na medida em que explica novos fenômenos além dos já descritos por modelos anteriores.

Saliento, novamente, que esses modelos da realidade física, elaborados pelo sujeito, não provêm nem dos fatos (ou dos observáveis), pois bastaria a abstração empírica para sua criação, nem dos sistemas lógicos do sujeito; eles provêm da interação entre os fatos e os sistemas operatórios. De outra forma, seria o mesmo que, em termos de processos cognitivos, afirmar que o processo de abstração reflexionante conduz a uma atualização dos sistemas operatórios, possibilitando abstrações empíricas mais ricas e estas, por sua vez, obrigando os sistemas operatórios a se atualizarem conforme a realidade física. Apesar de esse processo ser inconsciente para o indivíduo, tanto os modelos descritivos quanto os explicativos supõem que se estabeleça uma relação de representação, ou de correspondência, entre realidade e

modelo. E tal relação deve expressar um acordo, passível de verificação, entre o modelo e a realidade, entre teoria e experiência.

Desde as mais rudimentares estruturações da realidade pelo sujeito, nota-se que os modelos descritivos exigem que se estabeleçam semelhanças e diferenças entre fenômenos ou correspondências com situações análogas já estruturadas, o que qualifica o observável e aumenta a extensão do modelo descritivo. No entanto, não é esse o processo que possibilita ao sujeito desvendar as causas dos fenômenos. Piaget e Garcia (1973, p.22) afirmam que “[...] ateniéndose a este método de simple lectura empírica haciendo abstracción de los objectos, no se llega a la causalidad, sino a puras sucesiones regulares o leyes”⁶. Somente a busca da compreensão das causas de um determinado fenômeno conduzirá à elaboração de novos modelos explicativos da realidade.

É claro que a reestruturação dos modelos descritivos em explicativos exige do sujeito inúmeros processos de reflexionamento e de reflexão, próprios da abstração reflexionante. No entanto, é importante salientar que esse processo é originalmente inconsciente ao sujeito e somente mediante o processo de abstração refletida o sujeito estruturará um modelo explicativo, pois é o processo pelo qual o produto da abstração reflexionante se torna consciente.

[...] mesmo nas situações em que os problemas são diferentes e em que se trata de compreender e não de conseguir, o indivíduo, capacitado graças a suas ações [...] a estruturar operacionalmente [operatoriamente] o real, permanece muito tempo inconsciente de suas próprias estruturas cognitivas: mesmo se as aplica para seu uso individual e mesmo se as atribui aos objetos e aos acontecimentos para explicá-las causalmente, ele não faz dessas estruturas um tema de reflexão antes de ter atingido um nível bem mais elevado de abstração (PIAGET, 1978, p. 174).

Entendo que é no movimento entre a experimentação e a axiomatização que o objeto compreendido pelo sujeito vai se complexificando, ao mesmo tempo em que o sujeito passa a compreender os fenômenos, afastando-se da realidade imediata (aspectos mais superficiais do objeto), dirigindo-se para uma realidade mais profunda, na busca de compreensão de suas causas. São estes dois movimentos – constituição gradativa do objeto de conhecimento pelo sujeito e avanços em direção aos aspectos mais profundos da realidade – que levarão o sujeito a compreender a realidade física que o cerca e, ao mesmo tempo, criar novidades não somente individuais, mas para a comunidade científica.

⁶ “Atendo-se a este método de simples leitura empírica por abstração dos objetos não se chega a causalidade, mas sim a puras sucessões regulares ou leis” (tradução nossa).

6. METODOLOGIA DA PESQUISA

Como esta tese de doutorado caracteriza-se por ser um estudo embasado teoricamente na Epistemologia Genética de Jean Piaget, o referencial adotado para a coleta de dados é o método clínico piagetiano. O método clínico é um procedimento de coleta de dados que fornece ao pesquisador a possibilidade de compreensão das condutas do entrevistado. Ele é flexível para dar conta das inúmeras variáveis que podem surgir ao longo de uma experiência ou de uma entrevista. Ao mesmo tempo, exige uma organização muito rápida das hipóteses e do pensamento do pesquisador.

A entrevista clínica constitui-se de um

[...] interrogatório flexível adaptado a cada sujeito. A partir de algumas questões básicas, procura-se desenvolver um diálogo dirigido por hipóteses formuladas pelo examinador no decorrer da entrevista. Cada resposta dada pela criança leva à formulação de uma hipótese que engendra uma nova questão do examinador. É este encadeamento e sucessão de pergunta, resposta, nova hipótese, nova pergunta que dá coerência e unidade ao interrogatório (LEITE, 1995, p. 115).

Isso requer um método de coleta de dados que possibilite analisar o raciocínio empregado pelo sujeito enquanto efetua determinada tarefa, propondo, sempre, que o entrevistado explique como a realizou. Piaget (1926, p. 7) afirma que, no método de exploração crítica, o essencial é não sugerir a resposta, “mas em levar a falar livremente e em descobrir as tendências espontâneas em vez de canalizá-las e barrá-las. Consiste em situar todo sintoma num contexto mental em lugar de abstrair esse contexto”. Não obstante, os processos de pensamento não são visíveis exclusivamente pela observação pura do comportamento, pois o sujeito pode estar em alta atividade mental sem produzir uma ação observável.

Para auxiliar a coleta de dados foram formuladas situações nas quais os entrevistados buscariam explicações, evidenciando aspectos referentes às relações entre os conceitos das mecânicas clássica (de Newton) e relativística (de Einstein). As situações foram propostas visando a que o sujeito as comparasse, o que se caracterizou como fonte de novidades para os objetivos da pesquisa.

6.1. PARTICIPANTES

A coleta de dados aconteceu no Instituto de Física da UFRGS. Os sujeitos da pesquisa foram alunos que cursavam a disciplina Física III-D. Essa disciplina explora os seguintes assuntos relacionados à Física: ondas mecânicas e eletromagnéticas; reflexão, refração, interferência, difração e polarização da luz; e aspectos gerais da TRE. O fato de a disciplina tratar desses assuntos auxiliou, no momento da entrevista, na linguagem utilizada referente aos termos da Física. Foram realizadas vinte e uma entrevistas, cujos participantes eram, principalmente, alunos das engenharias.

6.2. PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

O primeiro contato com os sujeitos se deu por meio de mensagem enviada por correio eletrônico. Foi encaminhada uma mensagem para cerca de quinhentos alunos, explicitando a intenção da pesquisa, bem como os procedimentos para a coleta de dados caso aceitassem participar. Após uma semana, aproximadamente trinta alunos responderam, também por correio eletrônico, que gostariam e estariam disponíveis para participar da pesquisa. Com isso, foram feitas as combinações de horário e de local onde seria realizada a coleta de dados com cada aluno.

A coleta de dados foi feita individualmente e se deu com o auxílio de um gravador de áudio. Antes de iniciar a entrevista, esclareceu-se que a gravação era necessária para a posterior análise. Além disso, os entrevistados seriam representados por números, garantindo o anonimato. O equipamento foi montado em uma sala de laboratório, no Instituto de Física da UFRGS, e lá permaneceu cerca de trinta dias, tempo necessário para a realização das entrevistas. Foram feitas vinte e uma entrevistas e o indicativo para o término da coleta de dados foi a saturação das respostas. As entrevistas foram degravadas para melhor proceder as análises.

Cada sujeito assinou um termo de consentimento para a realização da pesquisa. As entrevistas duraram, em média, vinte e cinco minutos e transcorreram de maneira contínua. Salienta-se como aspecto importante que em nenhum momento da entrevista os sujeitos se dispersaram, seja por cansaço ou por desinteresse.

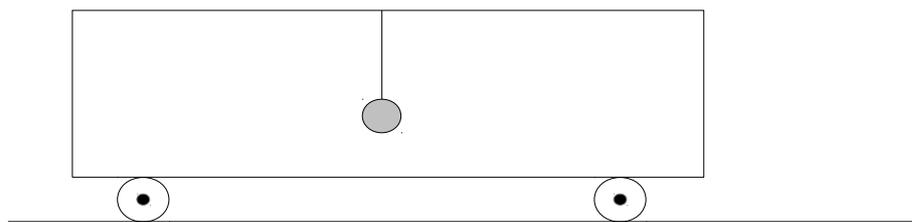
6.3. INSTRUMENTOS PARA A COLETA DE DADOS

Etapa 1 – Relatividade galileana: O objetivo desta etapa é analisar a compreensão do sujeito relativa às forças aplicadas em um pêndulo em movimento retilíneo uniforme. As condutas dos sujeitos, cuja descrição está de acordo com a realidade Física e a explicação corrobora os pressupostos teóricos da Mecânica Newtoniana, serão confrontadas com as condutas relativas às situações propostas na etapa 4.

A seguir, algumas perguntas identificadas como básicas no decorrer das entrevistas:

1.1) Imaginemos que no teto de um vagão penduramos um pêndulo simples, como a ilustração abaixo busca representar. Então, perguntamos aos sujeitos: “Saberias me dizer se há ou não há forças sendo aplicadas no pêndulo?”. “Se sim, quais?”

Ilustração 11 – Pêndulo simples preso no teto de um vagão



1.2) Essas forças têm a mesma intensidade ou não?

1.3) Se esse vagão se movesse com velocidade constante, achas que uma pessoa, no seu interior, veria o pêndulo na posição vertical ou inclinado?

1.4) Se esse vagão se movesse com velocidade constante, achas que uma pessoa, no seu interior, encontraria os mesmos valores de força?

1.5) Achas que isso (força resultante) é válido para qualquer observador ou não?

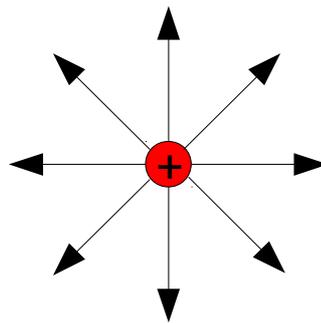
Etapa 2 – Cargas elétricas e campos: O objetivo desta etapa é analisar a compreensão dos sujeitos em relação aos fenômenos envolvendo cargas elétricas e seus respectivos campos gerados, assim como suas interações. Faz-se necessária essa análise, pois uma determinada

situação envolvendo cargas elétricas em movimento culminará em possíveis conflitos entre a Mecânica Newtoniana e a einsteniana.

A seguir, as principais perguntas no decorrer das entrevistas:

2.1) Eu encontrei em um livro de Física a seguinte figura:

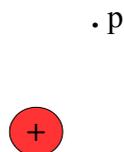
Ilustração 12 – Representação de uma carga elétrica e seu campo elétrico



“Saberias me explicar o que ela significa?”

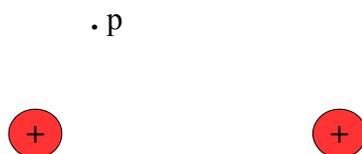
2.2) Se quiseres saber o campo elétrico em um ponto, por exemplo, o ponto p da figura abaixo, saberias representar?

Ilustração 13 – Representação de uma carga elétrica



2.3) Se tivéssemos outra carga positiva, na seguinte disposição, saberias representar o campo elétrico no ponto p ?

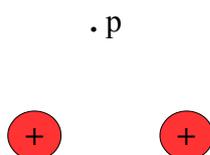
Ilustração 14 – Cargas elétricas



2.4) Em comparação com os dois casos anteriores, achas que o campo elétrico resultante no ponto p é o mesmo ou é diferente?

2.5) Se eu aproximasse as cargas, saberias representar o campo elétrico no ponto p ?

Ilustração 15 – Cargas elétricas



2.6) Em comparação com os dois casos anteriores, achas que o campo elétrico resultante no ponto p é o mesmo ou é diferente?

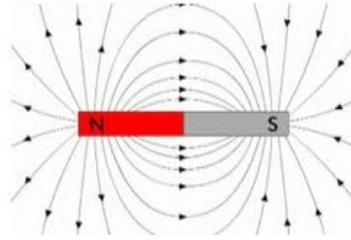
Após a pergunta 2.6, realizaram-se as mesmas perguntas 2.2), 2.3), 2.4), 2.5) e 2.6), porém, ao invés de se perguntar sobre o campo elétrico no ponto p , pergunta-se sobre a força elétrica exercida sobre uma partícula de prova com carga elétrica $-e^7$ situada no ponto p .

2.7) Quando conectamos as extremidades de um fio nos dois polos de uma pilha e entre as extremidades colocamos uma lâmpada, ela acenderá. Saberias me explicar porquê?

2.8) Eu encontrei em um livro de Física a seguinte figura. Poderias dizer o que ela representa?

⁷ Carga elementar do elétron

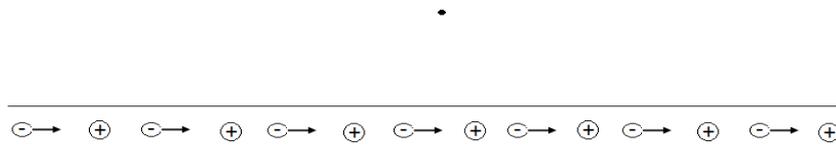
Ilustração 16 – Campo magnético gerado por um ímã



2.9) Dizem que, se aproximarmos uma bússola de um fio no qual é percorrido por uma corrente elétrica, a bússola sofreria uma interferência, ou seja, o ponteiro da bússola iria se mover. Achas que isso é verdade ou não? (No caso de a resposta ser negativa, pode-se optar por realizar uma experiência).

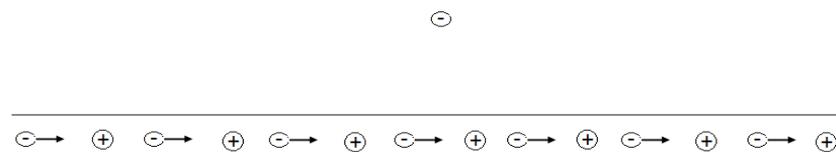
2.10) Nessa representação, saberias me dizer se há campo magnético no ponto p ? E campo elétrico?

Ilustração 17 – Corrente elétrica em um fio condutor



2.11) E se no ponto p colocarmos uma partícula com carga negativa, aconteceria algo com ela?

Ilustração 18 – Corrente elétrica em um fio condutor



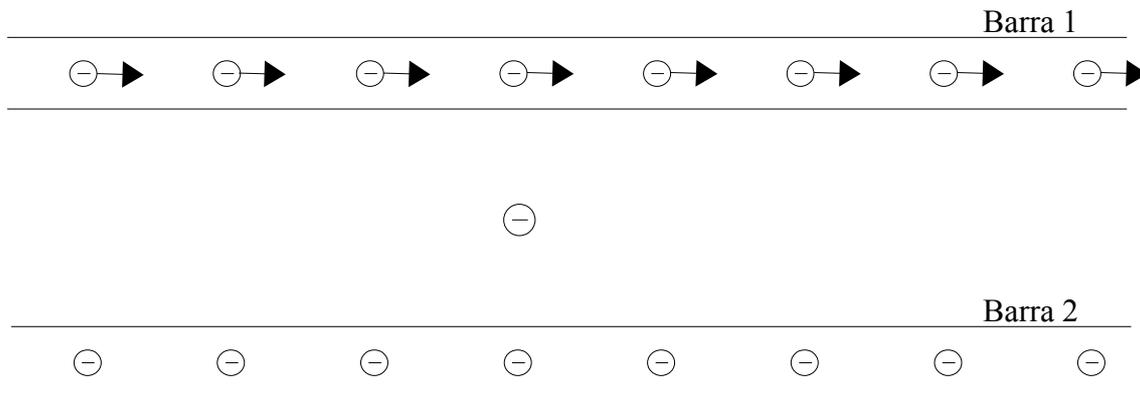
2.12) Essa força é uma força elétrica, magnética ou as duas?

Etapa 3 – O princípio da relatividade, segundo a TRE: O objetivo desta etapa é analisar a compreensão de que os resultados de determinados fenômenos podem resultar em conflitos entre a Mecânica Newtoniana e a einsteiniana, além de propiciar ao sujeito uma reflexão sobre a abrangência das teorias na Física.

Inicia-se esta etapa com o seguinte enunciado: Temos a seguinte situação: duas barras muito longas, 1 e 2, estão carregadas negativamente com a mesma densidade uniforme de cargas. Num ponto médio, temos uma partícula de prova negativa. Além disso, a barra 1 move-se com velocidade constante v em relação à barra 2. Então, perguntamos aos sujeitos:

3.1) Há alguma força sendo aplicada na partícula de prova?

Ilustração 19 – Barras carregadas eletricamente



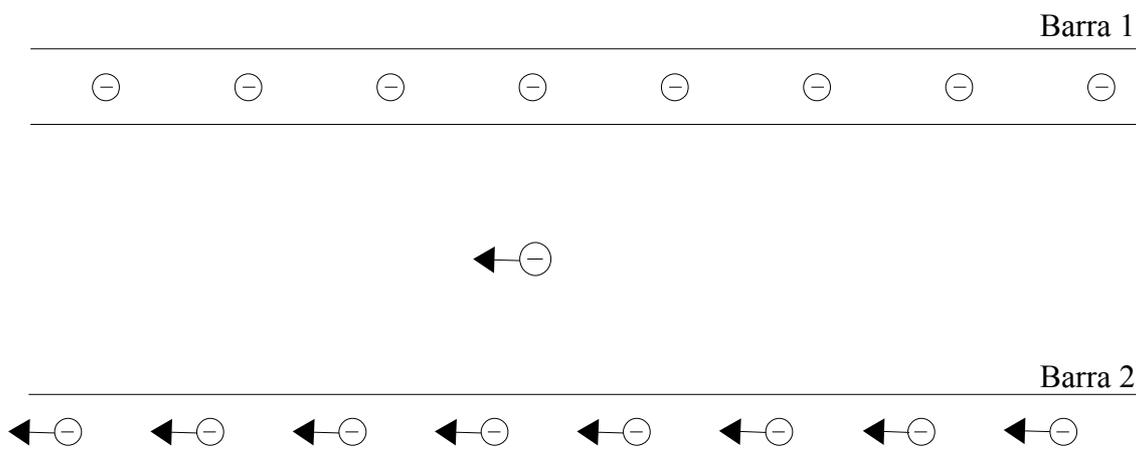
3.2) Saberias me dizer se haveria, ou não, força elétrica aplicada nesta carga de prova?

3.3) E força magnética, existiria ou não?

3.4) A carga de prova estaria parada ou se movendo? Acelerada ou não?

3.5) Imaginemos que agora a barra 2 se mova com velocidade constante $-v$, assim como a carga de prova, e que a barra 1 esteja parada, conforme ilustração abaixo:

Ilustração 20 – Barras carregadas eletricamente



Após este procedimento, realizaram-se as mesmas perguntas 3.1), 3.2), 3.3) e 3.4).

Etapa 4: Comparação das etapas 1 e 3: Esta etapa tem como objetivo confrontar as condutas do entrevistado diante das situações da etapa 3 com as da etapa 1. Essa comparação se mostrou importante principalmente por favorecer a reflexão dos sujeitos frente aos limites das teorias na Física.

Vejamos algumas perguntas:

4.1) Isso está de acordo com as leis de Newton? Como, anteriormente, a força resultante era zero, pela troca de referencial não deveria ser zero também?

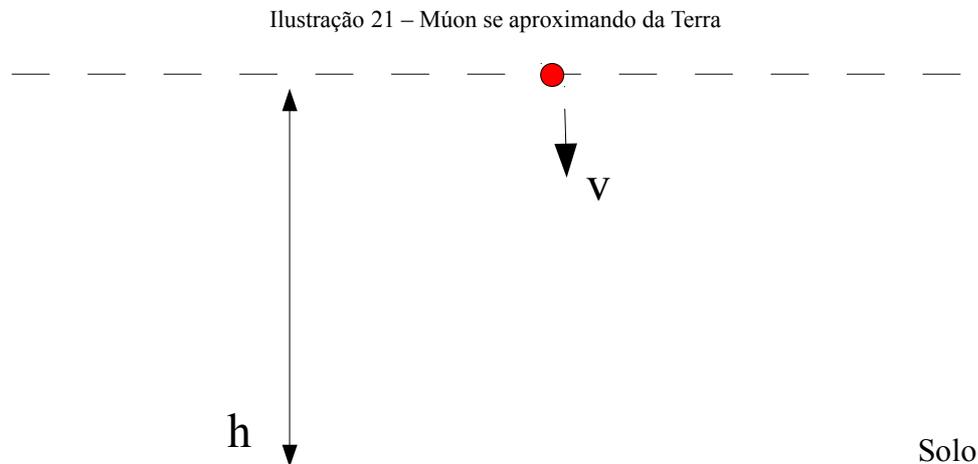
4.2) As barras têm o mesmo comprimento?

Etapa 5 – Problema relativístico: O objetivo desta etapa é analisar o modelo empregado na resolução da situação proposta e como esse modelo se atualiza, ou não, frente aos dados da realidade física. Essa etapa inicia-se com a seguinte introdução:

Uma partícula é gerada a uma altura de 9000 metros com velocidade de $0,998c$. Sabe-se que ela sobrevive durante 2×10^{-6} segundos.

Então, perguntamos aos sujeitos:

5.1) Esta partícula atinge o solo?



5.2) Esta partícula realmente é detectada. Saberias explicar como?

6.4. MÉTODO DE COLETA DE DADOS

Com o objetivo de mostrar a forma como foi feita a coleta de dados, transcreveremos integralmente, a seguir, uma entrevista. A intenção é expor a dinamicidade do método aplicado, possibilitando analisar não somente os resultados, mas os processos que levam a tal resultado.

Eu achei esta figura (vide ilustração 12) em um livro. Saberias me dizer o que ela pode representar? Essa aí é uma carga positiva e o campo elétrico gerado por ela. Se eu pegar uma outra partícula carregada (carga de prova) e colocar próxima da primeira, acontece alguma coisa ou não? Vai ter uma força resultante da interação dos dois campos. E seria de repulsão. E se eu colocar outra carga, tu achas que esta força de repulsão será maior, menor ou igual a antes? Vai ser maior.

Eu achei esta figura (vide ilustração 16) em um livro. Saberias me dizer o que ela pode representar? Essa figura representa o campo magnético de um dipolo. Se eu aproximar outro ímã, tu achas que vai acontecer alguma coisa ou não? Vai ter uma força de atração entre os dois ímãs. E se eu aproximar ainda mais estes ímãs, tu achas que a força vai mudar ou não? A força aumenta.

Eu elaborei uma ilustração (vide ilustração 18) de um fio pelo qual passa uma corrente elétrica e, à determinada distância, coloquei uma partícula carregada eletricamente. Saberias me dizer se há ou não alguma força sendo aplicada nessa partícula? Vai ter um campo magnético das cargas em movimento. Como o número de cargas positivas e negativas é o mesmo e o espaçamento entre elas é o mesmo, então o campo elétrico das cargas

negativas equivale aos das positivas. Então o campo elétrico resultante é nulo. Esse campo magnético, ao qual te referes, exerce uma força sobre a partícula ou não? Exerce. Um outro aluno falou que não teria força magnética pois esta carga está em repouso. O que achas? Ah tá. É verdade. Não, não estou sendo induzido, não. Por exemplo, se esta partícula fosse uma espira de um material condutor, somente haveria corrente elétrica induzida se houvesse movimento. Como não está variando o campo magnético, então tem campo, mas não tem força. É, ele tem razão.

Imaginemos, agora, duas barras muito longas, carregadas conforme esta ilustração (vide ilustração 19). Saberias me dizer qual a força resultante sobre a partícula? Aqui tens as cargas em movimento e tens campo magnético. Tem um campo elétrico também das partículas, mas serão anuladas. Se a [força] resultante do campo elétrico destas cargas (barra 1) for igual à força resultante destas cargas (barra 2), então anula-se o campo elétrico. Então, nesta configuração, a partícula ficaria em repouso.

(Realizamos a mesma situação anterior, mas agora trocando o referencial de análise (vide ilustração 20)). Saberias me dizer qual a força resultante sobre a partícula? A força resultante continua sendo zero, porque eu mudei o referencial, e como aqui não se encaixa a relatividade as coisas continuam na mesma.

(Realizo agora a etapa 1 do instrumento de coleta de dados). Dentro de um vagão penduramos um pêndulo simples. Saberias me dizer qual seria a força ou as forças aplicadas no pêndulo? Tem a força gravitacional e a tensão. Estas forças são iguais. E se o vagão se movesse? Se a velocidade for constante, vai ser tudo equivalente. Não importa a troca de referencial.

(Voltamos para as situações das ilustrações 19 e 20). Um outro aluno me explicou dizendo que aqui (ilustração 20), como a partícula está em movimento, então agirá sobre ela também uma força magnética. Assim sendo, a força elétrica resultante é nula, mas a magnética não. A conclusão é que lá (ilustração 11) a força resultante era nula e aqui (ilustração 20) não. Na verdade as partículas que estão em movimento são estas (barra 1) [movimento absoluto]. Então, não tem força magnética.

(É apresentada a situação da etapa 5) A partícula atingirá o solo? Isso é relatividade. Pois a velocidade é muito próxima a da luz. Não basta tu pegar a velocidade e o deslocamento dela para ver quanto tempo dura isso e tu relacionar com o tempo de vida dela. Tens que pegar o quanto ela andou, a velocidade e colocar numa equação do nosso amigo Einstein. Falaste de um “tempo de vida dela (partícula)”. Esse tempo é igual ou diferente deste (para o observador)? Pra ela é igual, mas um cara de fora vai ver que o tempo foi maior. Porque para ela o tempo passou mais lento, mas ela não sabe. Só sabe quando encontrar sua partícula irmã.

Como tu sabes que uma velocidade é próxima ou não a da luz? É, na verdade eu supus, porque tem um c aqui. Então eu imaginei que c é a velocidade da luz, e ela é muito próxima. Acho que qualquer coisa que se mova em torno de 40 ou 50% já deve aparecer algum efeito relativístico. E se for 30%? Acho que deve aparecer também. Se esta partícula se movesse a 100 km/h, achas que poderíamos aplicar a TRE ou não? Ela continuaria válida nesta velocidade ou não? Não, acho que não. Porque 100 km/h é muito menos que a velocidade da luz. Sempre vai ter o efeito relativístico, mas ele vai ser desprezível. Mas podemos aplicar ou não? Podemos sim, mas seria um esforço desnecessário. E podemos aplicar a teoria newtoniana para este problema ou não? Não, porque dentro deste contexto não se aplica Newton. Porque dentro da mecânica relativística está a mecânica clássica, mas o contrário não.

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Procederemos, agora, à análise e à discussão dos dados que foram coletados com o uso do Método Clínico piagetiano. Como já visto, a coleta de dados foi dividida em cinco etapas, intituladas respectivamente: *Etapa 1: Relatividade galileana*; *Etapa 2: Cargas elétricas e campos*; *Etapa 3: O princípio da relatividade segundo a TRE*; *Etapa 4: Comparação das etapas 1 e 3*; *Etapa 5: Problema relativístico*.

A maioria dos sujeitos que participaram desta pesquisa não apresentaram grandes dificuldades nas etapas 1 e 2. As poucas dificuldades que surgiram nessas etapas foram sanadas durante a própria coleta de dados, na qual o pesquisador, por meio de contra-argumentos, buscou propiciar situações nas quais os sujeitos raciocinassem sobre elas, chegando a conclusões diferentes das que tinham evidenciado antes da interferência do pesquisador. Para alguns leitores, essa interferência poderia ser vista como uma falha na aplicação do instrumento de coleta de dados pelo fato do pesquisador se utilizar do Método Clínico piagetiano. No entanto, as etapas 1 e 2 servem para realizar uma sondagem do quão familiarizados os sujeitos estão com a terminologia a ser utilizada ao longo da entrevista, assim como para saber se possíveis dificuldades futuras (nas etapas 3 e 5) poderiam estar relacionadas às dificuldades referentes à compreensão da Mecânica Newtoniana ou do eletromagnetismo.

Sendo assim, objetivou-se, nas etapas 1 e 2, garantir que possíveis dificuldades que poderiam se apresentar nas etapas seguintes não tivessem como causa dificuldades relacionadas às etapas iniciais. Por isso essa preocupação, nas duas primeiras etapas, em realizar a referida interferência quando se julgou necessária.

As etapas 3, 4 e 5 foram as que forneceram a maior quantidade dos dados que julguei como os mais importantes para o trabalho. Foi nessas etapas que ficou evidente o quão difícil é estabelecer os elos que relacionam as teorias newtoniana e einsteniana relativas à mecânica. A etapa 4 foi realizada não somente após a realização da etapa 3, mas também ao longo e no final da etapa 5. Isso, do ponto de vista do Método Clínico piagetiano, é encarado como algo interessante e, às vezes, necessário, visto que a mesma pergunta, ou as mesmas perguntas que objetivam, neste caso, levar o sujeito a realizar uma comparação, pode ser feita mais de uma vez e em vários momentos da entrevista.

É importante salientar, também, que as respostas dadas pelos sujeitos da pesquisa nas situações já realizadas, ao longo da coleta de dados, serviam como fonte de contra-argumentações das situações que estavam por vir. Então, mesmo quando os esforços eram concentrados nas situações da etapa 5, por exemplo, havia indagações espontâneas relativas à etapa 1. Isso mostrou a importância da escolha de uma metodologia de coleta de dados que fosse flexível e que possibilitasse ao pesquisador perseguir o pensamento do sujeito da pesquisa.

Para melhor realizar a discussão e a análise dos dados obtidos, dividirei, inicialmente, esta tarefa em duas partes: a primeira examina a importância da inserção da mudança de referenciais inerciais na problematização; e a segunda, sendo levada também pela primeira, sobre a elaboração de modelos explicativos e suas possíveis relações. Essa última será tratada como foco principal na análise e discussão dos dados. Ao final, relacionarei, entre si, a primeira e a segunda partes dessa discussão.

A partir dos trabalhos científicos que já realizei – entre os quais cito o mais importante, minha dissertação de mestrado intitulada “Noções de referencial inercial: um estudo de Epistemologia Genética com alunos de Física” (FREZZA, 2011) – e dos dados coletados nesta tese, a problematização acerca dos referenciais inerciais me faz ter a certeza do quão fecunda é essa abordagem para o ensino de Física. No trabalho de dissertação, ficou muito clara a exigência de atividade cognitiva por parte dos sujeitos para se elaborar uma noção de referencial, e mais ainda uma noção de referencial inercial. Agora, nesta tese de doutorado, novamente fica claro o aspecto desafiador, por isso mesmo frutífero, que é raciocinar sobre este tema.

Apresento, a seguir, alguns extratos de entrevistas que mostram o quão fecunda é esta problematização.

Na etapa 3, após a troca de referenciais discutida no problema das barras (ilustrações 19 e 20), o sujeito 05 esboça a seguinte reação: *Agora mudou. Caramba. Está contrariando completamente a lógica. Claro, agora ela está em movimento, então vai haver um campo magnético. Alguma coisa vai ter que mudar. Mas eu sei que não muda.*

Na etapa 3, após a discussão sobre as forças envolvidas no problema das barras (ilustrações 19 e 20), faço a seguinte pergunta: **Tu achas que essa troca de observadores somente é válida para a Física I (mecânica) ou também é válida para o eletromagnetismo?** Sujeito 04: *É que para mim, esta referência está [me]*

confundindo. Está gerando uma situação muito diferente. Eu ia dizer que o referencial não me parece muito importante, mas agora com isso daqui [...] O fato de tu mudar [a referência], já está mudando todo o resultado da análise. Eu acho que temos que escolher um ponto de referência bem padronizado, senão vai gerar resultados completamente diferentes.

A reação do sujeito 05 é muito esclarecedora do ponto de vista do quão impactante é a tomada de consciência dos conflitos provenientes da comparação entre duas situações. Nota-se que o ato de comparar duas situações mostra que o sujeito está buscando compreender as causas das diferenças e das semelhanças das duas situações, mesmo que, para ele, isso seja, inicialmente, inconsciente. O ato de comparar é, nitidamente, um ato reflexionante, pois o sujeito acaba por abstrair determinados dados de cada situação, elevando-os para um estado no qual a reflexão fará o papel integrador de tais dados em uma totalidade diferente da anterior. Está aqui uma das fontes da novidade. Neste processo constrói-se algo novo, algo que só é possível por meio da ação do sujeito.

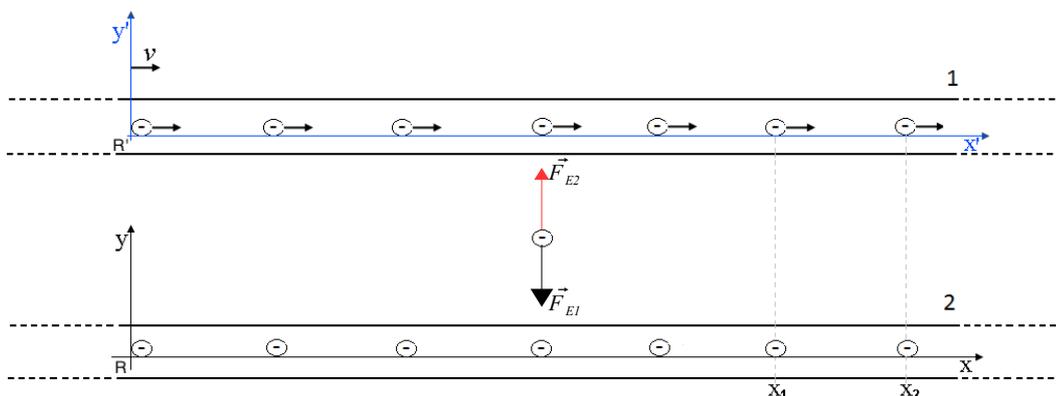
Parece claro, ao analisar as respostas dos sujeitos 04 e 05, que se fosse trabalhada apenas uma das situações, isso não serviria como conteúdo para a atualização de seu sistema cognitivo. No entanto, ao agir sobre as duas situações, o sujeito conseguiu assimilar dados que, quando relacionados, pareceram conflitantes. Essas são as possibilidades epistemológicas às quais já me referi. De forma alguma vejo isso como obstáculo para que o sujeito construa novos conhecimentos. Para Piaget (1995, p. 290), por mais conflitante que seja o produto de uma reflexão “[...] devido ao fato de que a abstração reflexionante vem a apreender as razões intrínsecas das coordenações que reconstrói e amplia por ocasião de seus reflexionamentos, atinge este notável resultado: um novo produto da reflexão não poderia contradizer os precedentes”. O mesmo não é afirmado sobre a abstração empírica, “[...] visto que um fato novo, graças a ela inferido, pode contradizer um modelo explicativo até sua completa eliminação [...]” (PIAGET, 1995, p. 291).

Ao centrarmos nossos interesses nos modelos descritivos e explicativos, estamos, de certa forma, evidenciando o papel fundamental do objeto de conhecimento na obra piagetiana. Para Piaget (1977, p. 101), o objeto de conhecimento “[...] só é bem observado quando compreendido, mas para ser compreendido deve ser bem observado”. Que fique claro, desde já, que o sentido da palavra “observado” não se restringe ao que é material. Tanto é que, ao buscar a origem etimológica da palavra observar, encontra-se *observare*, verbo latino, significa *cuidar de, guardar*. Essa relação entre o que é compreendido e o que é observado

mostra dois movimentos que, quando relacionados, leva o sujeito a compreender mais profundamente os caracteres do objeto de conhecimento. Enquanto o movimento de interiorização⁸ conduz à construção dos sistemas lógico-matemáticos, portanto, às conceituações pertinentes, a exteriorização⁹, leva, correlativamente, ao conhecimento experimental e às explicações causais, portanto, à elaboração de explicações físicas e de modelos explicativos.

Nesse movimento, como não poderia ser diferente, a ação do objeto de conhecimento tem fundamental importância na reelaboração dos modelos concebidos pelo sujeito. A análise das entrevistas dos sujeitos da pesquisa (especialmente a etapa 3 da coleta de dados) mostra como a problematização acerca da mudança de referenciais pode ser fonte de reelaborações. Vejamos a análise de parte da entrevista do sujeito 04. Ele julga existirem duas forças elétricas de igual intensidade, mesma direção e sentidos contrários, conforme ilustração abaixo:

Ilustração 22 – Situação 1: Força sobre carga de prova



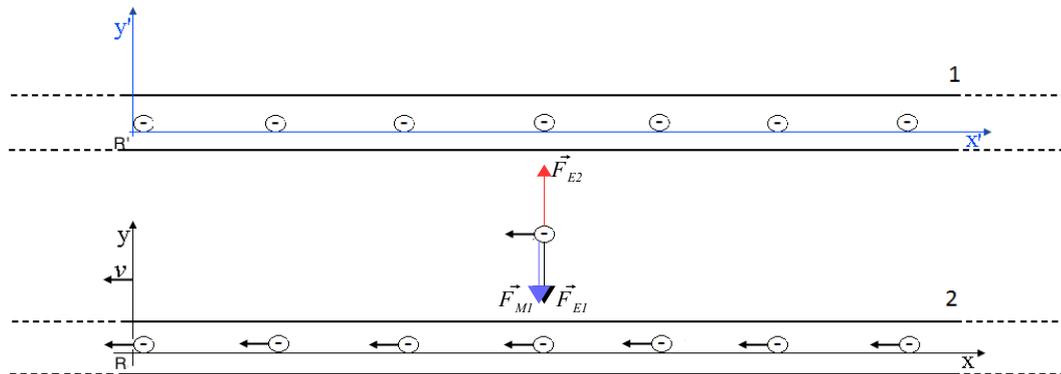
Por isso, para ele, a força resultante sobre a carga de prova é nula, o que é um julgamento correto fisicamente.

Já na situação 2, originada a partir da mudança de referencial, ele presume a existência de uma terceira força: a magnética.

⁸ Caracteriza-se pelo ato mental em que o sujeito volta-se à acomodação dos sistemas operatórios.

⁹ Caracteriza-se pelo ato mental pelo qual o sujeito estrutura a compreensão da realidade.

Ilustração 23 – Situação 2: Forças sobre carga de prova



Como, para ele, as duas primeiras forças (elétricas) continuam com as características evidenciadas na situação 1, esta terceira força faz com que a resultante das forças sobre a carga de prova seja diferente de zero. A mudança de referencial que era visto por ele, desde a etapa 1, como algo simples, agora o confunde.

Piaget (1995) afirma que o equilíbrio cognitivo caracteriza-se por um estado dinâmico de constantes trocas. Ao mesmo tempo em que essas trocas exigem uma atualização do sistema cognitivo, preserva-o enquanto sistema de operações. As constantes trocas entre o sistema cognitivo e o meio no qual o sujeito age são fontes de possíveis desequilíbrios. Piaget (1995, p. 283) cita as três principais causas dos desequilíbrios cognitivos:

- 1) Conflitos entre o sujeito e os objetos, por insuficiência de acomodação, pela não confirmação das previsões por ocasião das experiências, ou por defasagens temporais entre as acomodações a diferentes domínios; 2) Conflitos entre subsistemas, por falta momentânea de coordenação (assimilação e acomodação recíprocas) em particular, em caso de defasagem temporal entre suas respectivas elaborações; 3) Desequilíbrio entre a diferenciação e a integração, permanecendo, esta, de início, insuficiente. Uma forma sistemática de desequilíbrio é, por outro lado, constituída (e se manifesta pelas três formas precedentes) pelo atraso das negações em relação às afirmações, donde se origina uma falta inicial e muito geral das compensações.

A superação desse conflito exigirá que o sujeito abstraia características comuns de cada situação, possibilitando relacioná-las e confrontá-las em busca da causa das diferenças. Essa tarefa é, naturalmente, fonte de múltiplos desequilíbrios devido às novas dimensões a considerar, do que decorre a necessidade de novos reflexionamentos e reflexões. É a

superação destes desequilíbrios momentâneos que culminarão em novas relações, próprias da abstração reflexionante.

O sujeito 04 mostra a importância de se “escolher um ponto de referência bem padronizado”. Discute-se, então, o que seria este “ponto de referência”. Ele parece estabelecer relações que convergem com as dos cientistas do século XIX ao conceberem o éter como o meio luminífero. Assim, para ele, as medições, em relação a um referencial específico (referencial absoluto), seriam “padronizadas”.

Para complementar ainda mais esta primeira parte da análise dos dados, acerca da problematização dos referenciais, e mostrar as relações com a segunda parte da análise, apresento a seguir extratos de duas entrevistas:

Na etapa 3, durante a discussão sobre as forças envolvidas no problema das barras (ilustrações 19 e 20), realizo a seguinte pergunta: **Há, ou não, alguma força agindo na carga de prova?** *Sujeito 09: Aí teria força magnética [ilustração 19]. Talvez tivesse aí [ilustração 20] também. Não, não. Aí [ilustração 19] seria zero mesmo. A força resultante elétrica seria nula novamente, mas aqui [ilustração 20] teria uma força magnética, pois a carga está em movimento. Então aqui [ilustração 20] a força resultante seria diferente de zero. Concordas que nós fizemos uma... troca de referencial... Disseste que aqui [ilustração 19] a força resultante é zero, e que aqui [ilustração 20] é diferente de zero. Pois é, eu pensei nisso. Parece-me contraditório. Mas no pêndulo [etapa 1], como bem definiste, a troca de referencial não muda a força resultante no pêndulo. Pois é. Tem coisa errada aqui. Mas houve sujeitos que me disseram que esta troca de referenciais somente é válida pra mecânica, não sendo válida para o eletromagnetismo. E outros, ainda, me disseram que a troca de referenciais é válida para os dois casos. Eu nunca pensei nisso: nessa troca de referenciais se é válido pra um e não para o outro. Mas eu mantenho minha posição: que aqui [ilustração 19] a força resultante é zero e que aqui [ilustração 20] é diferente de zero.*

Na etapa 3, durante a discussão sobre as forças envolvidas no problema das barras (ilustrações 19 e 20), faço a seguinte pergunta: **Existe, ou não, uma força magnética sendo exercida na carga de prova?** *Sujeito 16: Mudou o referencial. Teria sim, porque agora ela está em movimento. Teria uma força magnética. A elétrica teria. Então a força resultante não é zero. Então tem coisa errada. Deveria ser igual. Então está errado meu raciocínio? Houve sujeitos que disseram que esta troca de referenciais somente é válida para a mecânica, não sendo válida para o eletromagnetismo. Mas houve sujeitos que disseram ser válida para os dois casos. Acho que teria que dar a mesma coisa. A outra barra se movendo não anularia o campo magnético da outra? Não, não. Nada a ver. Vou continuar com minha teoria do início. Nos primórdios da física, eu aprendi que eu poderia adotar qualquer referencial que isso não ia mudar o resultado. Mas para o eletromagnetismo eu não sei.*

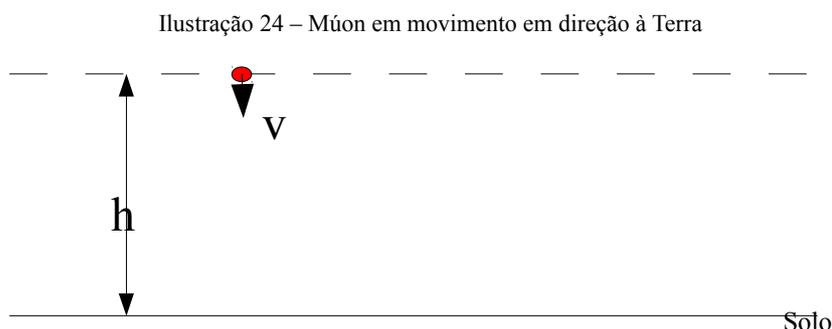
Notamos, por esses extratos, que os sujeitos 09 e 16 chegam ao mesmo ponto de impasse: o que é mais significativo, a análise das forças ou a invariância dos referenciais inerciais? Dizendo de outra forma: o princípio da relatividade é válido para a Mecânica Newtoniana, mas não para a eletrodinâmica, ou o princípio da relatividade é válido tanto para a Mecânica Newtoniana quanto para a eletrodinâmica? Para o sujeito 09, a solução a que chegou é sustentada pela própria coerência lógica que deu origem a ela, caracterizando a necessidade interna de satisfazer sua coerência. O que é coerente para ele é a existência de forças diferentes em duas situações cuja única diferença é a mudança de referencial. Para ele, essa mudança realmente causa o aparecimento de uma força magnética. Apesar de que na etapa 1, quando se tratou da mudança de referenciais em um problema típico de mecânica (pêndulo preso no teto de um vagão), ele respondeu prontamente que nas duas situações (cuja diferença também era devido à mudança de referencial) o resultado era o mesmo, ou seja, que a força resultante era igual a zero. No problema de eletromagnetismo, porém, nota-se o contrário. A atenção dele está voltada não para os referenciais, mas para as forças envolvidas. Em suma, o sujeito 09 prende-se à consequência da troca de referenciais e não à causa que origina tais diferenças. Ele constrói um modelo de interpretação para cada caso que busca resolver, mas não unifica os casos em uma totalidade que aumente a amplitude explicativa. Fica evidente, no entanto, a dificuldade na reelaboração dos modelos descritivos que, por sua vez, são condição necessária para a elaboração de modelos explicativos da realidade. Suas elaborações são fontes de múltiplos desequilíbrios devidos à exigência de coerência entre o modelo e a realidade que somente a busca das causas pode garantir.

Já o sujeito 16, apesar de confrontar os próprios resultados obtidos a partir das suas ações, acaba por justificar tal posição a partir de um fator externo, independente de suas ações. Sua justificativa está atrelada ao fato de que alguém, em algum momento, informou-o que a mudança de referenciais não afetaria o resultado. Parece confiar mais nos “primórdios da Física” do que em sua compreensão sobre as situações, por falta de um modelo explicativo que sustente seus argumentos.

Diferentemente do sujeito 16, o sujeito 09 constrói um modelo explicativo originário de suas ações, desafiado pela problemática em questão. São tais extratos que auxiliarão na análise das relações entre modelos explicativos da Mecânica Newtoniana e os da mecânica relativística de Einstein.

Com esse objetivo em mente, centrar-me-ei, agora, na etapa 5 do instrumento de coleta de dados. Inicialmente, trarei à discussão alguns extratos das entrevistas realizadas a respeito da seguinte situação: Uma partícula é gerada a uma altura de 9000 metros com velocidade de $0,998c$. Sabe-se que ela sobrevive durante 2×10^{-6} segundos. Esta partícula atinge o solo ou não?

Esse problema pode ser representado da seguinte forma:



Tomarei a liberdade de arrolar os extratos necessários para a conclusão desta parte da pesquisa e só então comentá-los. A sequência dos extratos não é aleatória, pois segue uma ordem de complexidade crescente do raciocínio empregado para resolver a problemática.

Sujeito 08: *Acho que sim. Saberias me dizer como ter certeza? Não sei. Outro aluno tentou resolver por $v = \Delta x / \Delta t$, sabendo o valor da velocidade v e o deslocamento Δx ele encontrou o intervalo de tempo Δt . É exatamente isso que estava pensando. [faz os cálculos e conclui] É, então não colide. Mas a experiência mostra que esta partícula, que os pesquisadores chamam de múon, realmente atinge a placa detectora. Bom. Se a Física clássica não é condizente com o que acontece, então pode ser algo relacionado com a Física relativística. Por que achas isso? Porque é o que me vem à mente. Se não é a Física clássica então deve ser a relativística. Eu tive alguns alunos que de imediato falaram que esse problema envolvia a TRE, pois a velocidade era muito alta. Concordas? Concordo. Mas o que seria, para ti, uma velocidade alta? O que tive na Física é que seria algo em torno de $0,75c$. Se fosse 1000 km/h , tu achas que poderíamos aplicar a TRE? Não, muito baixa. Daí só a mecânica clássica.*

Sujeito 05: *Ela está com a velocidade muito próxima à da luz. Então distorce o tempo e o espaço. Isso envolve a teoria da relatividade. Sei que quando troca de referencial é meio complicado. Eu teria que fazer uma correção. Sei que não é uma fórmula simples. Teve outro aluno que tentou resolver por $v = \Delta x / \Delta t$, sabendo o valor da velocidade v e o deslocamento Δx ele encontrou o intervalo de tempo Δt . Não, não. Teríamos que aplicar uma correção. Como a velocidade está muito próxima à da luz, então não daria certo com a Física de Newton. Se Newton não*

explica, saberias explicar como esta partícula chega até a placa? Por causa da distorção do tempo e do espaço. Como ela está com velocidade muito alta, talvez distorça o tempo de vida dela. E se esta partícula não estivesse a uma velocidade tão alta, tão próxima à da luz, achas que teria essa distorção? Não, aí não. E como tu defines o que é próximo ou o que é distante do valor da velocidade da luz? Um dia eu já me perguntei sobre isso, mas nunca fui atrás. Tudo o que eu li falava [que era] próximo da [velocidade] luz. Mas em termos numéricos eu não saberia.

Sujeito 12: [resolve partindo das noções newtonianas de espaço e tempo, utilizando-se de $v = x\Delta/\Delta t$, concluindo]: **Então, não vai chegar. Mas o problema é que a experiência mostra que essa partícula, que os pesquisadores chamam de múon, realmente atinge a placa detectora. Tem g (aceleração da gravidade)? Ela não sofre a influência da aceleração da gravidade. Teoria da relatividade de Einstein? Pode ser. A questão da dilatação do tempo e da contração do espaço. Mas por que isso acontece? Aí é uma viagem. Tu achas que isso depende da velocidade? Com certeza. Como a velocidade é próxima a da luz, vai acontecer isso. E se fosse 0,1c, o que regeria esse problema? Acho que a de Einstein, porque ainda seria muito alta. E se a velocidade fosse 100 km/h? Aí acho que não. Porque aí o problema seria regido pelas leis de Newton, da mecânica clássica. Até onde seria válida a TRE? Aí teria que fazer uma média. Mas se ela for pequena não é válida a TRE. Se for alta não é válida a mecânica clássica.**

Sujeito 07: **Isso é relatividade. Pois a velocidade é muito próxima à da luz. Não basta tu pegar a velocidade e o deslocamento dela para ver quanto tempo dura isso e tu relacionar com o tempo de vida dela. Tens que pegar o quanto ela andou, a velocidade e colocar numas equações do nosso amigo Einstein. Falaste de um tempo da partícula. Esse tempo é igual ou diferente deste [tempo próprio]? Para ela é igual, mas um observador de fora vai ver que o tempo foi maior. Porque para ela o tempo passou mais lento, mas ela não sabe. Como tu sabes que uma velocidade é próxima ou não à da luz? É, na verdade eu supus, porque tem um c aqui. Então eu imaginei que c é a velocidade da luz, e ela é muito próxima. Acho que qualquer coisa que se mova em torno de 40 ou 50% já deve aparecer algum efeito relativístico. E se for 30%? Acho que deve aparecer também. Se esta partícula se movesse a 100 km/h, achas que poderíamos aplicar a TRE? Ela continuaria válida nesta velocidade? Não, acho que não. Porque 100 km/h é muito menos que a velocidade da luz. Sempre vai ter o efeito relativístico, mas ele vai ser desprezível. Mas podemos aplicar? Podemos sim, mas seria um esforço desnecessário. E podemos aplicar a teoria newtoniana para este problema [do múon]? Não, porque dentro deste contexto não se aplica Newton. Porque dentro da mecânica relativística está a mecânica clássica, mas o contrário não.**

Para melhor explicitar a evolução dos modelos utilizados para descrever e explicar a problemática, farei inicialmente uma comparação aos pares dos extratos acima. Ela se deterá, inicialmente, nos aspectos relacionados às próprias noções dos sujeitos frente aos conteúdos físicos abordados. Julga-se necessária essa primeira comparação por dois motivos: pela complexidade dos próprios conteúdos envolvidos; por servir como ponto de partida para as próximas reflexões (essas voltadas às formas de organização do pensamento).

Começarei tal comparação confrontando e, ao mesmo tempo, relacionando, os dois primeiros extratos. O sujeito 08 elabora uma estratégia de resolução do problema com uma abordagem baseada na Mecânica Newtoniana, ao buscar relacionar espaço e tempo como grandezas absolutas, evidenciando a relação com a velocidade da seguinte forma: $v = \Delta x / \Delta t$. É evidente que, por utilizar um referencial fixo no solo, ele não se preocupa em diferenciar tempo e espaço próprios e relativos. Conclui ainda que a velocidade é o que define se a abordagem do problema será dada via Mecânica Newtoniana ou via mecânica relativística de Einstein.

O interessante nessa análise é que existe, para ele, um valor que define o grau de generalidade de uma teoria. Mesmo que essa informação seja proveniente de uma fonte externa, e não de construção teórica própria a partir de sua ação mental sobre o problema, ele a aceita por falta de um modelo explicativo que sustente as novidades próprias da situação. Seria equivalente afirmar que a natureza, para ele, se manifesta de forma diferente para objetos que se movem com velocidades acima de um valor estipulado em comparação a situações em que objetos se movem com velocidades menores.

Diferentemente do sujeito 08, o 05, ao começar a leitura da questão proposta, compreende se tratar de um problema relacionado com a TRE. Essa conclusão se deve ao valor da velocidade, que ele considera próxima à da luz. Apesar da reação do sujeito 05 não ser tão explícita como a do 08, há uma semelhança na forma como ambos interpretam o problema. Eles compreendem que o valor da velocidade define se o problema se relaciona com a mecânica de Newton ou com a de Einstein. O sujeito 05, porém, esboça uma diferenciação entre tempo próprio e relativo. Acaba por interpretar que o tempo, explicitamente comentado ao longo da entrevista, não é absoluto. Prova disso é a solução encontrada para explicar a causa de a partícula atingir a placa detectora.

O sujeito 12, corroborando em grande parte as ideias do sujeito 05, deixa clara a distinção entre problemas que são regidos pela Mecânica Newtoniana dos problemas que são regidos pela mecânica einsteiniana. Afirma, categoricamente, que é a velocidade o grande delimitador de qual teoria regerá o problema. Já o sujeito 07, diferenciando-se dos acima mencionados, apesar de colocar em evidência o papel do valor da velocidade, não a trata como um delimitador da generalidade de uma teoria. Relativiza a aplicação de uma teoria levando em consideração os dados da situação. Torna sua aplicação, de certa forma, subjetiva,

pois o modelo do qual se utiliza para explicar uma situação ou fenômeno depende, às vezes, do grau de precisão que se quer.

Feita essa primeira comparação, exploraremos mais profundamente as formas com que se organizam os pensamentos dos sujeitos frente à problemática. Esses pensamentos são organizados com o intuito de responder tanto às perguntas realizadas pelo pesquisador quanto às perguntas que os próprios entrevistados elaboram ao longo da entrevista. Para analisar essas formas de organização do pensamento, que aqui chamarei de modelos explicativos, faz-se necessária primeiramente a compreensão de que as

[...] reequilibrações não constituem, senão em certos casos, retornos ao equilíbrio anterior: aqueles que são os mais fundamentais para o desenvolvimento consistem, ao contrário em formações não somente de um novo equilíbrio, mas ainda, em geral, de um melhor equilíbrio, o que nos fará falar de 'equilibrações majorantes' e o que levantará a questão da auto-organização [...] (PIAGET, 1976, p. 11).

Piaget, apesar de parecer não dar muita ênfase à distinção entre os tipos de equilibração – a que tem como consequência o desenvolvimento cognitivo do sujeito (equilibração majorante) da que retorna ao equilíbrio anterior (sem mudança estrutural) – abre, para este trabalho, uma discussão interessante do ponto de vista dos modelos explicativos e de suas possíveis atualizações (evoluções). Se é bem verdade que o desenvolvimento cognitivo só ocorre mediante a ação do sujeito, o contrário não é válido. Nada garante que a ação do sujeito trará como consequência seu desenvolvimento cognitivo. Se assim fosse, a existência do sujeito seria suficiente para seu próprio desenvolvimento cognitivo, não denotando, desse modo, um modelo interacionista de conhecimento, mas um espontaneísmo maturacionista.

No entanto, se pensarmos no papel ativo do objeto de conhecimento, fica evidente que o processo de desenvolvimento cognitivo decorre da interação entre sujeito e objeto de conhecimento. Nessa interação, dependendo do grau de novidade dos caracteres do objeto que o sujeito consegue assimilar, pode-se fazer necessária a acomodação de seu sistema cognitivo a fim de incorporar esses novos caracteres. Esses caracteres, por sua vez, são organizados pelo sistema cognitivo em modelos explicativos, cuja evolução é conduzida de forma estreita com o desenvolvimento cognitivo do sujeito. Conforme Parrat-Dayana (1998, p. 28),

São os estudos piagetianos da causalidade os que permitem perceber claramente que entre as operações do sujeito e a realidade (situações, objetos, conteúdos) atuam os modelos interpretativos do sujeito através dos quais se relacionam os aspectos internos e externos do conhecimento.

Dessa forma, a reequilibração não necessariamente culmina no desenvolvimento cognitivo do sujeito, pois essa pode ser um processo no qual o sujeito volta ao estado de equilíbrio anterior à assimilação dos caracteres exteriores por não conseguir acomodar seu sistema cognitivo frente à novidade. Ou, pelo contrário, pode haver um novo estado de equilíbrio, mais estável que o anterior, se o sujeito for capaz de acomodar o seu sistema cognitivo. Esse processo de formação do novo estado de equilíbrio chama-se (re)equilibração majorante. Do mesmo modo acontece com os modelos explicativos: um dado novo, retirado do objeto, das ações sobre o objeto ou das coordenações das ações, graças à atividade cognitiva do sujeito, pode ser incorporado no modelo construído pelo sujeito para explicar uma situação ou um conjunto de situações. A não incorporação do dado novo ao modelo vigente pode ser devida ou à falta de coerência entre a novidade e o modelo explicativo ou ao elevado grau de novidade que o dado traz em relação ao modelo vigente.

Com isso em mente, como um sujeito, tendo construído um modelo explicativo relacionado à Mecânica Newtoniana, pode vir a explicar situações relacionadas à mecânica relativística? Poderia o sujeito realizar uma transposição de um modelo explicativo, como o newtoniano, para outras situações? A resposta para essa última pergunta é: positiva se os caracteres abstraídos dessas situações tiverem como consequência da sua incorporação no modelo explicativo o aumento em extensão; negativa se os caracteres abstraídos de tais situações forem contraditórios frente ao modelo explicativo. Nesse caso, o sujeito, ao buscar compreender as causas de tal contradição, pode chegar a um dos seguintes desfechos: descartar o dado contraditório; incorporar o dado contraditório ao modelo explicativo vigente; eliminar o modelo explicativo vigente e, como consequência, elaborar um novo modelo.

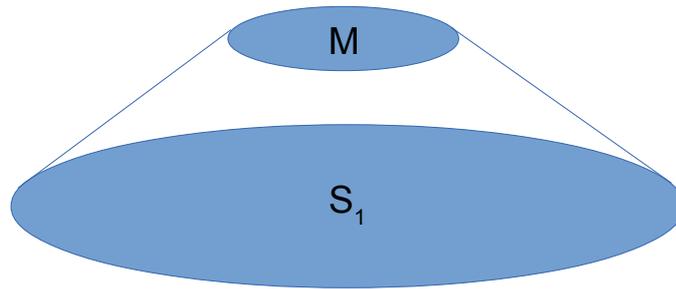
Com o objetivo de analisar as estruturações dos sujeitos diante das situações apresentadas ao longo da entrevista, salientarei os modelos explicativos elaborados e os apresentarei em ordem de evolução, diferenciando-os pela complexidade das axiomatizações. Além disso, evidenciarei as possíveis relações entre os conhecimentos da Mecânica Newtoniana e os da mecânica einsteiniana.

7.1. SOBERANIA DO MODELO EXPLICATIVO BASEADO NA MECÂNICA CLÁSSICA

Encontrei, no conjunto de entrevistas, um grupo de 6 sujeitos cujas ações, frente às situações colocadas durante a coleta de dados, baseavam-se em conceitos de espaço e de tempo newtonianos, configurando um modelo explicativo fundamentado na mecânica clássica (o qual denominarei M). Para esses sujeitos, não haveria relação entre os conhecimentos da Mecânica Newtoniana e os da mecânica einsteniana, pois ainda não tinham domínio do modelo relativístico (pelo menos não como um modelo que desse conta da problemática proposta). Eles têm elaborado modelos explicativos fundados na mecânica clássica; no entanto, por ser o único modelo que haviam constituído para explicar os fenômenos relacionados aos movimentos, os limites da aplicabilidade de tal modelo são instáveis. Dessa forma, ao se deparar com uma situação nova, fora dos limites da aplicabilidade do modelo explicativo da mecânica clássica, os sujeitos ou não conseguiam assimilar tais dados (oriundos das situações da TRE) ou os entendiam como conflitantes para o modelo que haviam construído até então. Não conseguindo explicar as razões dos conflitos, não conseguiram elaborar um novo modelo explicativo, possivelmente devido ao elevado grau de novidade dessa situação. Mesmo que alguns sujeitos tivessem conseguido assimilar os novos dados, percebidos como conflitantes com o modelo M, o processo de equilíbrio não conseguiu atingir um patamar de maior estabilidade. Falaremos nesse caso de equilíbrio, não ainda majorante.

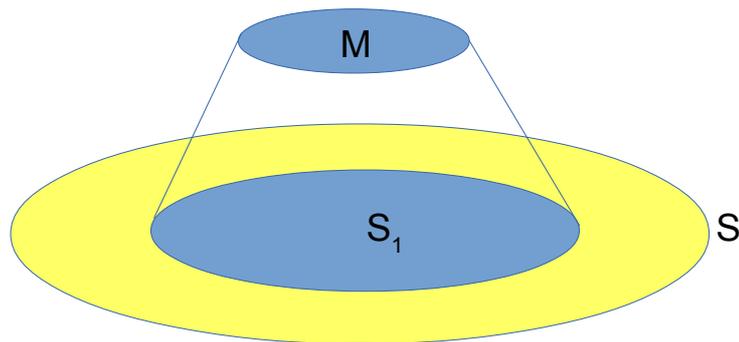
É notório que, para esses sujeitos, o modelo M é aplicado a qualquer situação da natureza. A ilustração abaixo busca representar a aplicabilidade do modelo frente às situações por ele explicadas. Como o modelo M é, para esses sujeitos, o único válido para explicar as situações da mecânica e como os limites de sua aplicabilidade não são bem delimitados, tem-se que o conjunto de situações por ele explicadas (que nomearei S_1) tem, para os referidos sujeitos, alcance universal, isso é, comporta todos os fenômenos relacionados aos movimentos.

Ilustração 25 – Modelo M e sua aplicabilidade



No entanto, se analisarmos, a partir de uma estruturação mais complexa, essa gama de situações S₁ é apenas uma parte do conjunto de situações possíveis da Física (que nomearei S).

Ilustração 26 – Modelo M e sua aplicabilidade frente à totalidade das situações

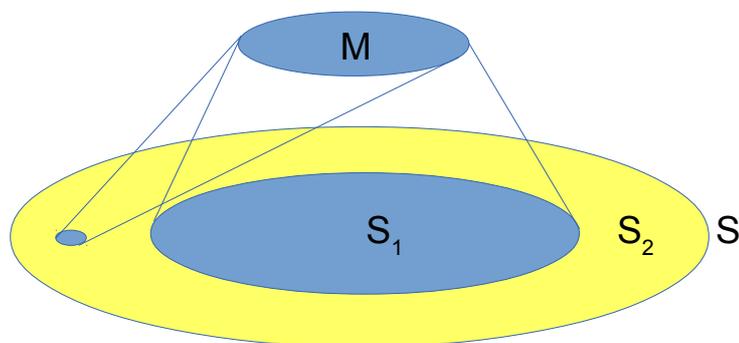


O sujeito, tendo construído o modelo M – e o fez na relação entre experimentação e axiomatização – tem consciência da aplicação de M para S₁. Contudo, isso não significa que o sujeito esteja consciente dos limites dessa aplicabilidade, visto que a generalidade de seu modelo é dado pelo equilíbrio entre as afirmações e negações das situações por ele aplicadas. Assim, para determinados sujeitos tem-se que S = S₁ (como é o caso do primeiro grupo) e para outros que S > S₁. Dizemos, então, que S₁ implica M, mas a recíproca não é verdadeira.

Tem-se ainda um conjunto diferença entre S e S₁, que chamarei de S₂ (S₂ = S – S₁). Esse conjunto engloba situações que poderão servir como fonte de dados para o sujeito atualizar seu modelo explicativo frente à realidade. Assim, nada impede que o sujeito busque relacionar uma situação do conjunto S₂ com o modelo M, visto que a consciência de S₂ tem

como pré-requisito uma negação ($S_2=S.\bar{S}_1$) que, no curso do desenvolvimento cognitivo, é tardia quando comparada com as afirmações.

Ilustração 27 – Modelo M e sua não-aplicabilidade



Notei, em todas as entrevistas, o quão produtivo foi propor uma situação cujos dados dela abstraídos não pudessem ser explicados pelo modelo M. Todos os entrevistados compreenderam que os dados abstraídos da situação proposta faziam parte de um conjunto de fenômenos que não poderiam ser explicados pelo modelo M, mesmo que esse tenha sido utilizado para a previsão dos resultados da situação. O sujeito 03, por exemplo, ao ser questionado sobre a possibilidade da partícula atingir o solo, elabora uma forma para verificar a realidade tendo como base pressupostos do modelo M. Ele afirma:

Eu tentaria algo sobre a velocidade e os segundos aqui (tempo). Eu faria assim: quanto tempo demoraria, com esta velocidade, para a partícula se mover estes 9000 m? Se este tempo for menor do que os 2×10^{-6} s, diria sim, ela consegue. Se o tempo for maior, aí não.

A estratégia elaborada pelo sujeito 03 está coerente com as bases da mecânica clássica newtoniana, todavia o modelo M não oferece suporte para compreender o que ocorre na realidade (a partícula atingir a placa detectora). Ele, assim como os demais sujeitos que compunham esse grupo, conclui afirmando que “Não saberia explicar”¹⁰.

¹⁰ É importante salientar que, num contexto geral, a afirmação “Não saberia explicar”, expressa por alguns entrevistados, poderia representar uma resposta não-importista. No entanto, ficou claro, no contexto da coleta de dados, que tal afirmação referia-se à impossibilidade do entrevistado de explicar uma situação.

É claro, no entanto, que reações como a do sujeito 03 não são as únicas possíveis. Esse movimento de incorporação de novos dados ao modelo M pode: enriquecer o modelo M em extensão, caso os novos dados sejam totalmente explicados por esse modelo sem serem necessárias modificações do mesmo; enriquecer o modelo M em compreensão, caso os novos dados exijam alguma modificação do modelo para que sejam explicados. No entanto, se os novos dados contradizem o modelo M, então ou serão descartados (reação comum aos sujeitos desse grupo) ou uma necessidade intrínseca exigirá modificações mais profundas. Essas modificações, por sua vez, podem ser realizadas a fim de que as contradições sejam superadas pela organização do modelo. Caso o sujeito não obtenha êxito na superação das contradições, os novos dados podem servir como ponto de partida para a construção de um novo modelo, preservando, ou não, o modelo M. Em caso de preservação, uma das consequências é a perda de sua generalidade, visto que a aplicabilidade de M acaba se restringindo a um determinado conjunto de situações. Com essa restrição, torna-se necessário saber quais os limites de aplicabilidade de M, visto que há situações em que apenas o modelo novo a ser construído será condizente com a realidade. No entanto, se não houver preservação do modelo M, falaremos, então, de eliminação do modelo M.

7.2. DIFERENCIAÇÃO DOS MODELOS EXPLICATIVOS COMO CONDIÇÃO PARA RELACIONAR A MECÂNICA DE NEWTON COM A DE EINSTEIN

Encontrei um segundo grupo de 11 sujeitos que, ao se deparar com uma situação nova, conseguiam compreendê-la como conflitante ao relacionarem-na com o modelo explicativo M. Ao contrário dos sujeitos do primeiro grupo, eles procuraram elaborar (ou reelaborar, no caso em que o modelo já havia sido constituído em situações anteriores à entrevista) um modelo explicativo M' para tal situação. Esse modelo M' está relacionado com as bases da mecânica relativística de Einstein e, por isso, se diferencia do modelo M. Mas isso cria outro problema a ser resolvido pelos sujeitos: delimitar a aplicabilidade de cada modelo. Para esse grupo de sujeitos, não há uma relação entre um modelo e outro, visto que não há nenhuma intersecção entre os domínios desses modelos explicativos. Por isso, a ênfase de que a diferenciação da aplicabilidade dos modelos é dada pelo valor da velocidade do fenômeno que se analisa. Normalmente, os sujeitos diferenciam esse valor por considerá-lo próximo ou distante do valor da velocidade de propagação da luz.

Apesar de alguns sujeitos considerarem um valor para o que supõem ser próximo da velocidade da luz, isso pouco interessa à nossa análise. O importante é compreender como se dá a diferenciação dos dois modelos por ocasião de sua aplicação. Podemos afirmar que os sujeitos deste grupo entendem os dois modelos como incomensuráveis e contraditórios, visto que as situações, às quais são aplicados, devem ser distintas. Para eles, a tentativa de compreender uma situação, relacionada ao modelo M', através de outro modelo (M), gera, como consequência, uma incompatibilidade com a realidade. Ao serem confrontados com a informação de que a partícula realmente é detectada por uma placa fixa ao solo, apesar de não conseguirem explicar as reais causas do fenômeno, acabam por esboçar um novo modelo para interpretação desta realidade até então desconhecida. Isso fica claro, por exemplo, quando o sujeito 05 afirma que a falsa previsão é “Por causa da distorção do tempo e do espaço. Como ela [partícula] está com velocidade muito alta [próxima à da luz], talvez distorça o tempo de vida dela”.

Essa possibilidade de explicar um acontecimento de forma diferente da antecipada pelo sujeito abre caminho para a elaboração de um novo modelo M'. Salientamos, novamente, o importante papel da equilibração no desenvolvimento dos modelos explicativos, visto que os desequilíbrios cognitivos predispõem o sujeito a ultrapassar seu estado cognitivo atual na busca de um nível mais estável. No que tange os modelos explicativos, dizemos que a superação dos desequilíbrios cognitivos tem como consequência a atualização dos modelos frente a realidade que se busca explicar. Piaget (1976, p. 21), ao falar sobre tais desequilíbrios, afirma

[...] é que consistindo a marcha espontânea do espírito em centrar-se sobre afirmações e os caracteres positivos dos objetos, ações ou mesmo operações, as negações são então negligenciadas ou não se constroem senão secundária e laboriosamente. Como elas são necessárias a todas as formas de equilibração estas não se realizam senão através de muitas dificuldades.

Nesse percurso de busca da compreensão da TRE, podem ocorrer momentos de contradição que resultariam de um desequilíbrio entre as afirmações e as negações. No momento em que se afirma algo, para defini-lo, faz-se implicitamente uma negação (porque este “algo” não é outra coisa). Quando, no objetivo de se compreender algo, o sujeito se concentra nas afirmações sem se preocupar com as negações, contradições certamente

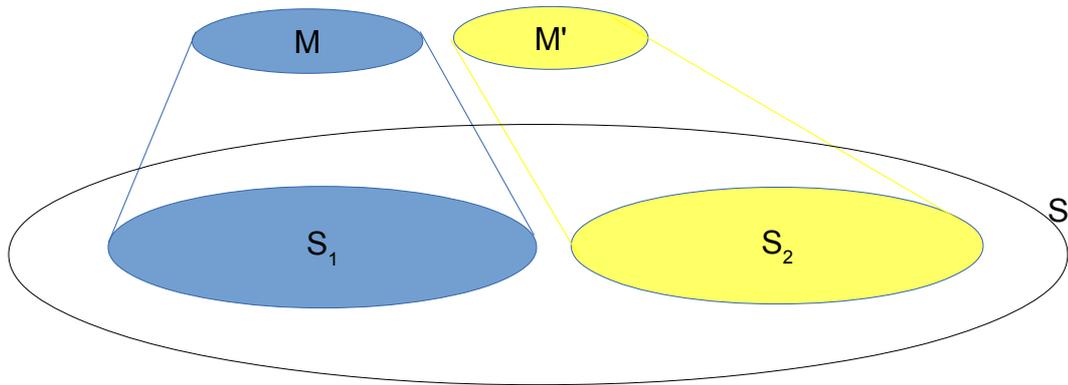
ocorrerão. É esse desequilíbrio entre as afirmações e as negações que dificultam a delimitação da aplicabilidade de cada modelo, assim como sua generalidade.

Em *Recherches sur la contradiction* (1974), Piaget afirma que os únicos casos em que a negação é precoce são aqueles em que o sujeito não tem de construí-la, porque ela é imposta de fora. Por exemplo, uma contestação dos fatos em resposta a uma previsão falsa. Totalmente diferente é a busca por entender as razões desta falsa previsão, o que exige distinguir propriedades positivas P e sua ausência $\neg P$ com justificação desta negação. Quanto ao modelo M , utilizado para prever se a partícula atingiria o solo ou não, na procura das razões da falsa previsão, faz-se necessária a dissociação de S em S_1 e S_2 . Referente a essa dissociação, resulta outro problema: compreender que todos os S_1 são S , mas nem todos os S são S_1 . Essa reversibilidade do pensamento é o resultado operatório da coordenação das negações e afirmações. Uma possível falta de simetria entre a afirmação e a negação compromete, além dos limites de S_1 e S_2 , a própria aplicabilidade de M .

Ao mesmo tempo em que o sujeito vai estendendo os limites de S_1 por força de suas ações, começa a compreender que nem todos os S são explicados por M . Surge, então, a necessidade de diferenciar S em S_1 e S_2 , sendo $S_1 = S \cdot \neg S_2$. Consequentemente, os limites referentes à aplicabilidade de M aos S ficam mais definidos. Diminui-se a extensão do modelo, mas, como consequência, aumenta-se a compreensão das situações por ele explicadas. As ações do sujeito que visam a compreender as razões da aplicabilidade de M à S_1 , tornam o modelo cada vez mais rico em compreensão. Porém, é na tentativa de explicar as causas da não aplicabilidade de M a algumas S_2 que, além de enriquecer a compreensão do modelo, torna-o mais estável na medida em que se definem melhor os limites de sua aplicabilidade. Havendo interesse do sujeito em compreender as razões da não aplicabilidade de M para S_2 – e o interesse é consequência de um desequilíbrio –, faz-se necessária a construção de um novo modelo explicativo (M'). Mesmo que o modelo M' não tenha relação alguma com os conteúdos de M (e aqui poderemos falar de uma incomensurabilidade), fica claro que a necessidade da construção de M' se deve também a M , já que ele perde sua generalidade ao não se aplicar a S_2 .

No decorrer das entrevistas, muitos sujeitos admitiam uma diferenciação dos modelos M e M' , como ilustrado abaixo:

Ilustração 28 – Modelos M e M' e suas aplicabilidades



Contudo, essa diferenciação baseia-se muito mais em dados observáveis do que em explicações provenientes da atividade mental dos sujeitos. Normalmente, o que define a diferença entre os modelos é um dado externo ao sujeito, como a velocidade de algo que compõe um fenômeno. No extrato do sujeito 12, por exemplo, isso é notório:

Tu achas que isso depende da velocidade? *Com certeza. Como a velocidade é próxima à da luz, vai acontecer isso. E se fosse 0,1c, o que regeria este problema?* *Acho que a [mecânica] de Einstein, porque ainda seria muito alta. E se a velocidade fosse 100 km/h? Ai acho que não. Porque aí o problema seria regido pelas leis de Newton da mecânica clássica. Até onde seria válida a TRE? Aí teria que fazer uma média. Mas se ela for pequena, não é válida a TRE. Se for alta, não é válida a mecânica clássica.*

Logo, para esse sujeito, se um objeto se move com velocidade acima de um determinado valor, deverá ser válido o modelo M'. Se a velocidade com que se move um objeto tiver valor menor que esse determinado valor, então deverá ser válido o modelo M. Tendo em mente que os sujeitos buscam compreender a realidade, é curioso que essa diferenciação dos modelos acaba por dividir a própria realidade. Se a velocidade é maior que um determinado valor, então esse fenômeno integra um grupo de situações S₂. Se ao contrário, então integra um conjunto de situações S₁.

Mas se, dependendo da velocidade, ora uma situação faz parte de S₁ e ora faz parte de S₂, em que momento acontecerá essa transição? Independente dos valores mencionados pelos sujeitos (30%, 50% ou 70% do valor da velocidade da luz), algo há de comum nas afirmações de todos eles: a existência de um determinado valor que diferencia duas realidades. Por conta disso, afirmamos que os sujeitos elaboram dois modelos que são vistos como contraditórios

em relação às situações que são aplicadas. Essa forma de estruturação de pensamento seria a primeira grande elaboração dos sujeitos ao construírem um novo sistema de significação de uma realidade física até então não dominada. Seriam, neste caso, dois modelos isolados por conta dos conteúdos que visam explicar.

7.3. COORDENAÇÃO DOS MODELOS EXPLICATIVOS

A partir do estudo sobre a generalização, falarei de um terceiro grupo de 4 sujeitos que elaboram uma relação entre as mecânicas de Newton e de Einstein, baseando-se no grau de generalidade de cada uma delas, o que possibilita diferenciá-las e, ao mesmo tempo, coordená-las em uma nova totalidade. Compreender que, apesar da elaboração de dois modelos, o que se busca é explicar a realidade física; isso é algo que somente esses sujeitos conseguem. Ao conseguirem relacionar os modelos, compreendem que há uma sucessão deles, visto que o modelo explicativo M' engloba, em seu grau de aplicabilidade e de generalidade, o modelo explicativo M. Assim sendo, só podemos falar em sucessão de modelos ou de teorias na medida em que as relações e as diferenças entre os modelos explicativos se tornam conscientes ao sujeito.

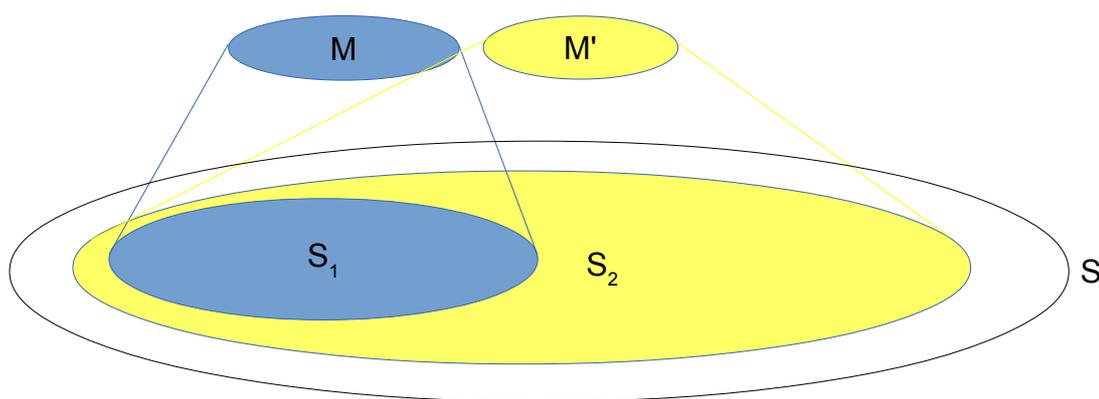
A evolução destes modelos (e falarei dela devido às constantes atualizações dos modelos frente às situações que esses buscam explicar), inicialmente diferenciados por conta dos conteúdos, dirige-se a uma coordenação, cuja consequência é delimitar a generalidade das situações abordadas por cada um. Todavia, como diversas situações isoladas podem vir a ser relacionadas? O sujeito, na tentativa de compreender a razão das diferenciações, acaba por abstrair também as características comuns das diversas situações. Em geral, o que há de comum nas diversas situações pode ser abstraído por simples leitura dos fatos, possibilitando ao sujeito chegar a uma generalização indutiva, logo probabilística. Diferente é a busca da compreensão das causas das relações dos produtos das abstrações reflexionantes, o que possibilita incluir outras situações não mais por recorrência dos caracteres retirados das situações, mas por generalização dedutiva, logo categórica.

Na tentativa de melhor elucidar essa questão, tomemos duas situações: uma onda se propagando em uma corda de densidade d_1 incide sobre uma junção de uma corda de densidade d_2 (sendo $d_2 > d_1$); e uma onda sonora se propagando no ar incide sobre uma parede

rígida. Nas duas situações¹¹ haverá reflexão com inversão de fase. O que se pode depreender disso? A partir das duas situações, poder-se-ia concluir que toda onda que sofre reflexão teria uma inversão na sua fase (o que é uma generalização indutiva incorreta, visto que nem toda onda, ao sofrer reflexão, inverte a fase). Diferente é a generalização dedutiva, visto que ela tem como base fundamental a compreensão das situações. Poder-se-ia, então, concluir que qualquer onda que se propaga de um meio de menor densidade para outro de maior densidade, sofrerá reflexão com inversão de fase. Isso é produto de uma generalização dedutiva, o que torna possível a inclusão de novas situações em uma totalidade que não se baseia mais nos observáveis de um fenômeno, mas, sim, nas causas que lhe deram origem.

Entretanto, no início, a diferenciação entre M e M', assim como os próprios limites de S₁ e S₂, não são bem definidos. É evidente que isso resulta do fato de M' ainda não estar bem estruturado, ou seja, ainda ser muito instável diante da diversidade de dados que podem ser assimilados e vistos como contraditórios. Com as atualizações progressivas de M e M', o sujeito começa a compreender que a aplicabilidade de M' não se resume apenas a S₂, mas estende-se também a S₁. No entanto, vale ressaltar que a forma como o sujeito analisa uma situação pertencente à S₁ por meio do modelo M é diferente da forma quando analisada por meio do modelo M'. Isso porque cada modelo carrega consigo um conjunto de conceitos e suas relações que possibilitam analisar de formas diferentes uma mesma situação.

Ilustração 29 – Modelos M e M' e a relação entre suas aplicabilidades



A coordenação dos dois modelos (M e M') tem como consequência uma maior delimitação de S₁ e S₂. Diminui-se, com isso, a extensão da aplicabilidade de M, mas há um aumento em

¹¹ Estamos considerando que em ambas situações os meios de propagação tenham a mesma elasticidade.

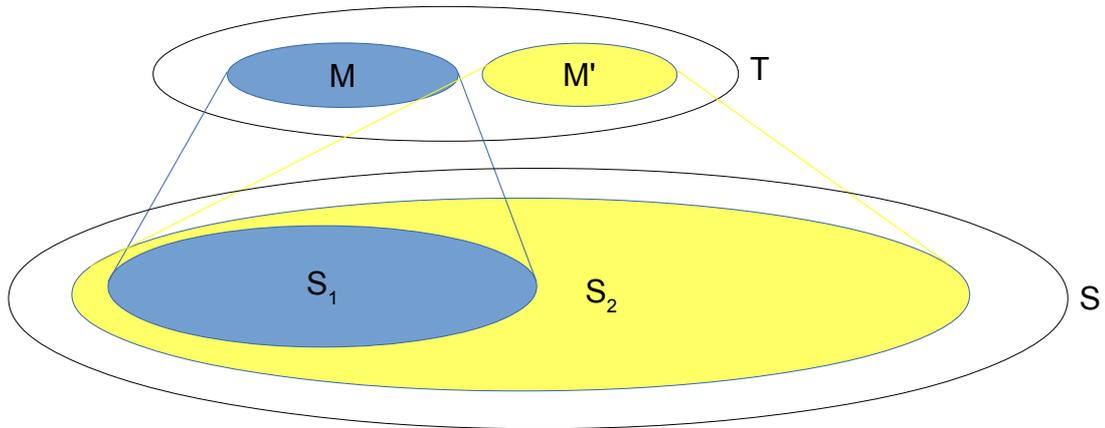
compreensão, uma vez que, com a diminuição da generalidade de M, acaba-se por compreender as razões da delimitação. Já para o modelo M', há aumento nos dois sentidos. Aumento em extensão por englobar as situações abordadas por M (S_1), e aumento em compreensão, visto que o sujeito busca compreender as razões dessa incorporação. Segundo Henriques (*apud* Piaget, 1976, p. 29) “uma teoria mais geral que contém teorias menos gerais, explica mais que estas, quer tomadas isoladamente ou em conjunto”. Isso fica evidente ao analisarmos o extrato do sujeito 07:

Se esta partícula se movesse a 100 km/h, achas que poderíamos aplicar a TRE? Ela continuaria válida nesta velocidade? Não, acho que não. Porque 100 km/h é muito menos que a velocidade da luz. Sempre vai ter o efeito relativístico, mas ele vai ser desprezível. **Mas podemos aplicar?** Podemos sim, mas seria um esforço desnecessário. **E podemos aplicar a teoria newtoniana para este problema (do múon)?** Não, porque dentro deste contexto não se aplica Newton. Porque dentro da mecânica relativística está a mecânica clássica, mas o contrário não.

O sujeito 15 conclui de forma parecida à do sujeito 07. Ao se deparar com a situação na qual o sujeito teve de elaborar uma solução para o caso da partícula colidir ou não com o solo, o sujeito 15 alega “Tem que calcular o tempo de queda. Daí é só fazer $V=\Delta x/\Delta t$ ”. No entanto, quando perguntado sobre a possibilidade de buscar compreender um fenômeno, envolvendo velocidades em torno de 60 km/h, a partir de pressupostos da TRE, afirma “Acho que não daria errado, só acho que não se manifestaria em grandes efeitos”.

Nota-se que os modelos M e M', por serem, em sua origem, sistemas de significação que carregam conteúdos e lhes atribuem significados, podem ser entendidos como incomensuráveis no que tange as premissas de cada modelo. No entanto, vale lembrar que M' origina-se da contradição oriunda da tentativa de se aplicar M à S_2 , visto que a resolução de uma contradição “conduz ao mesmo tempo a distinções e, portanto, a uma diferenciação de noções, e a um esforço de coerência e, portanto, a coordenações” (PIAGET *apud* DOMINGUES, 1992, p. 155). Isso porque M é limitado aos conteúdos de S_1 , não sendo aplicáveis aos conteúdos de S_2 . No entanto, se ambos se originam da interação entre sujeito e objeto de conhecimento, é claro que os mecanismos cognitivos utilizados pelos sujeitos devem, necessariamente, estar relacionados. Por isso, entendo que a coordenação desses dois modelos M e M' exige uma totalidade que os englobe, permitindo essa coordenação.

Ilustração 30 – Relação entre os modelos M e M'



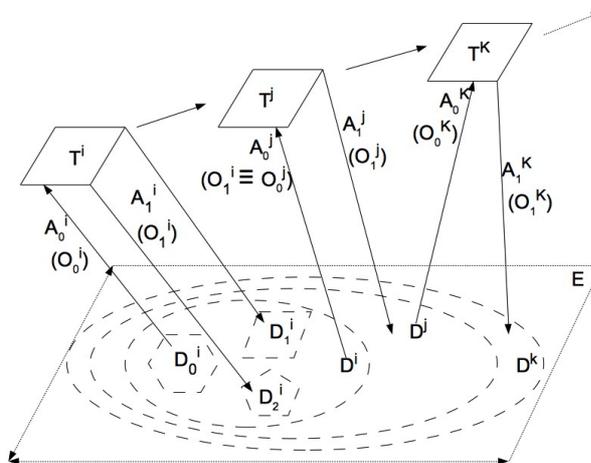
Assim, podemos entender que M aplica-se às situações que compõem S mas não são S_2 ($M \rightarrow S \setminus S_2$) e que M' aplica-se a S_2 ($M' \rightarrow S_2$), de forma que $S_1 \subseteq S_2$. Dessa forma fica claro o papel das negações parciais e das inclusões envolvidas na construção dos modelos explicativos. Ao mesmo tempo em que os modelos M e M' se diferenciam por meio das afirmações, elaborar uma totalidade T que inclua e coordene M e M' é não somente afirmar o que cada um dos modelos tem de próprio, mas, ainda, excluir, logo negar, as propriedades que um modelo não comporta e que pertencem ao outro. Constituir uma totalidade T é abstrair, positivamente, as propriedades comuns a todos os Modelos (M_n), mas também distinguir, e desta vez negativamente, as propriedades não pertencentes à totalidade T.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabemos, pela Epistemologia Genética de Jean Piaget e colaboradores, que o sujeito epistêmico passa de um nível de menor conhecimento para um conhecimento de maior complexidade cognitiva na medida de suas ações e da apropriação de suas ações até atingir seus mecanismos íntimos. Esse processo pode ser explicado de maneira satisfatória com a compreensão do mecanismo da abstração reflexionante. O presente trabalho teve como objetivo não apenas corroborar o trabalho de Piaget, mas trazer a teoria piagetiana para o campo da aprendizagem em Física em situação experimental.

Podemos admitir que é a abstração reflexionante, assim como a consciência dos resultados desse processo, que possibilita que o sujeito elabore modelos explicativos da realidade, compreendendo os domínios de cada modelo e as relações entre eles, formando totalidades novas. É no jogo entre reflexionamentos e reflexões que o sujeito atualiza o modelo explicativo para um conjunto de situações, compreendendo melhor os limites de sua aplicabilidade. Contudo, como vimos pelas entrevistas, a consciência de que as situações explicadas por um determinado modelo (M) também poderiam ser explicadas por um modelo mais geral (M') é tardia, o que corrobora as pesquisas de Piaget sobre a abstração reflexionante (1977) e a tomada de consciência (1974). Para melhor representar esse processo e pôr em relação os modelos constituídos pelos sujeitos e seus respectivos domínios, podemos nos basear no esquema abaixo, retirado do livro *Psicogênese e História das ciências* (PIAGET & GARCIA, 2011, p. 285).

Ilustração 31 – Sucessão de teorias



Em termos gerais, este esquema¹² tem como objetivo ilustrar a evolução das teorias ao longo da história da ciência e fazer um paralelo com o desenvolvimento cognitivo do sujeito epistêmico. A funcionalidade desse esquema pode ser entendida da seguinte forma: o ponto de partida de uma teoria física T_i é a interação entre o sujeito e o objeto de conhecimento (neste caso um fenômeno cujo propósito é sua explicação); a incorporação de novos dados a partir dos observáveis O_0^i é dada pelo processo de abstração empírica A_0^i ; no entanto, a aplicabilidade de T_i se reduz ao domínio D_0^i cujos O_0^i podem ser abstraídos por A_0^i ; nas palavras de Piaget e Garcia (2011, p. 283), “[...] a teoria em questão aceita um subconjunto O_0^i e reconstrói os outros O_1^i . Essa divisão dos O^i em O_0^i e O_1^i é sempre relativa à teoria em questão”; o processo pelo qual se constrói o O_1^i nos domínios $D_1, D_2 \dots D_n$ é denominado abstração reflexionante A_1^i ; a passagem de uma teoria T_i a uma outra T_j é tal que:

- I. os O_1^i de T_i (ou, pelo menos, alguns) são considerados como O_0^j em relação a T_j ;
- II. T_j é aplicável a todos os D_0^j compreendendo também outros domínios (ou seja, $D^i \subset D^j$). Assim resulta que o processo de abstração que levou aos O_1^i (abstração de nível A_1 em relação a T_i) é considerado agora como um A_0 em relação à nova teoria. (PIAGET & GARCIA, 2011, p. 284)

O que ainda não sabíamos era o que poderia originar um sentimento de necessidade para elaborar um novo modelo explicativo. Ficou muito claro nas entrevistas o papel fundamental de se propor uma situação passível de ser entendida pelo sujeito como conflitante (como a situação da partícula em direção ao solo) e o papel da velocidade na delimitação da aplicabilidade dos modelos explicativos.

A cada nível, algumas construções anteriores permanecem aceitas, ao mesmo tempo em que são elaboradas novas construções. Isto é válido tanto para a criança quanto para o físico quântico. O que é particular neste processo é que, a partir de cada novo estágio, recua-se ao ‘plano da experiência’ com novos esquemas interpretativos que enriquecem as ideias de partidas com as quais se constrói o estágio presente. Mas este ‘enriquecimento’ não consiste unicamente na descoberta de novas propriedades

¹²D = Domínio

E = Plano da experiência, no qual S (Situação) e F (fenômeno) são dados.

T_i, T_j, T_k = Teorias Mecânicas Sucessivas

A_0^i, A_0^j, A_0^k = Abstrações do tipo empírico em relação às teorias T_i, T_j, T_k .

A_1^i, A_1^j, A_1^k = Abstrações reflexionantes em relação às teorias T_i, T_j, T_k .

O_0^i = “observável” em relação a T_i .

O_1^i = construção teórica em relação a T_i , mas “observável” em relação a T_j .

dos objetos e de novas relações. Muitas vezes, é o próprio objeto que é modificado, e essa modificação tem um sentido muito preciso: trata-se do fato de certas propriedades dos objetos de partida não poderem mais ser aceitas sem chegar a contradições no interior do esquema interpretativo [...]. [Isto mostra que] não se trata de uma sucessão de estruturas subsumidas umas pelas outras. O processo é muito mais complexo, e essa complexidade reflete-se nas dificuldades inerentes às tentativas de formalização (PIAGET & GARCIA, 2011, p. 281).

Notamos em nossas entrevistas que quando da incorporação do dado novo ao modelo explicativo, este processo pode ter, pelo menos, três consequências: aumento em extensão do modelo explicativo; aumento em compreensão do modelo explicativo; extinção do modelo explicativo e, com isso, a necessidade da elaboração de um novo modelo. O aumento em extensão do modelo explicativo se dá quando os novos caracteres abstraídos são incorporados ao modelo explicativo sem a necessidade de mudanças na coerência do modelo. Ao serem questionados sobre as situações da etapa 1 do instrumento de coleta de dados, os sujeitos de pesquisa desta tese afirmavam que a força resultante era a mesma sobre o pêndulo no vagão, independentemente da escolha do referencial inercial. Isso mostra que qualquer outro referencial, desde que inercial, tomado como apto para analisar a situação, resultaria em situações cujos resultados seriam os mesmos. O mesmo poderíamos afirmar sobre um sujeito que compreende que uma maçã, ao despencar de uma macieira, tem sua queda acelerada devido à força que a Terra exerce sobre ela. Consideremos que o mesmo sujeito pode generalizar isso para inúmeros casos, pois compreende que a mesma explicação pode ser admitida independente se o objeto físico que se move em sentido ao centro da Terra é uma maçã, um lápis ou uma moeda. Consideremos, entretanto, que esse sujeito não saiba se pode admitir essa explicação para a órbita da Terra em torno do Sol. Com o intuito de resolver tal situação, poderá concluir que o modelo que explica o movimento da maçã também explica o movimento de translação da Terra em torno do Sol. Nos dois casos, dizemos, então, que o modelo explicativo não aumentou em compreensão, mas, simplesmente, conseguiu explicar um número maior de casos sem sofrer alterações. Por isso seu aumento foi apenas em extensão.

Entretanto, o aumento em extensão de um modelo explicativo pode levar a um aumento em compreensão e vice-versa. Na etapa 3 do instrumento de coleta de dados, muitos dos sujeitos que participaram desta tese tomaram como premissa a invariância dos resultados de um fenômeno quando analisado perante dois referenciais inerciais que se movem um em relação ao outro, independentemente se o fenômeno analisado fazia parte da mecânica ou da eletrodinâmica. A partir das tentativas de explicar as situações postas, alguns sujeitos criaram

soluções que tiveram como consequência um enriquecimento do modelo explicativo em compreensão. Tais situações serviram como fontes de desequilíbrios que, superados, elevaram o grau de compreensão do modelo explicativo. Essa relação entre extensão e compreensão parece ser evidente se compreendermos que não há compreensão sem conteúdo a ser compreendido. Os dados que enriquecem um modelo em extensão servem, também, como conteúdos sobre os quais o sujeito pode agir. A busca das razões destes novos dados serem incorporados ao modelo vigente, pode acarretar, também, um aumento em compreensão do modelo explicativo.

Por fim, um modelo explicativo pode ser eliminado devido à falta de coerência com as situações observadas ou devido à reorganização do próprio sistema cognitivo. Essa reorganização ficou evidente em alguns sujeitos que compreenderam que a invariância dos referenciais inerciais não é válida somente para a Mecânica Newtoniana, mas também para a TRE. Diferente é o caso da eliminação de um modelo devida à falta de coerência com os dados observados (como é o caso da situação do múon na etapa 5). Nesse caso, os caracteres não são abstraídos das ações ou das coordenadas do sujeito, mas dos observáveis que podem colocar à prova a veracidade de um modelo explicativo até então vigente.

A tendência do pensamento que consiste em eliminar e superar as contradições associa-se a busca permanente de uma coerência, exigência esta do pensamento que visa à consciência interna de um sistema epistêmico ou interpretativo bem como o acordo com a realidade (DOMINGUES, 1992, p. 155).

Vimos, no entanto, no decorrer das entrevistas, o quanto os sujeitos conseguem, e com certa facilidade, eliminar os modelos até então elaborados. E para isso eles têm uma razão bem clara. No momento em que se constrói um modelo em cujas bases estão as causas daquilo que se busca explicar, um dado novo será compreendido como contraditório se confrontado com os alicerces que deram origem ao modelo. Relacionar as causas que alicerçam um modelo explicativo com dados novos exige um empenho cognitivo muito maior do que simplesmente incorporar ou descartar dados (contraditórios ou não) a modelos mais instáveis (mais suscetíveis de serem eliminados).

Por meio da análise dos dados, podemos fazer uma reflexão sobre o esquema apresentado por Piaget e Garcia: até que ponto, o sujeito toma consciência das relações entre teorias? Ou então, do ponto de vista do sujeito, há relação entre as teorias? E se há relação

entre elas, há consciência de relações evolutivas entre elas? A análise dos dados desta tese mostra que a consciência da evolução das teorias é ponto de chegada de um longo processo que começa, antes de relacionar, por diferenciar dois modelos explicativos (M e M'); só tardiamente tais relações se tornam conscientes – se o sujeito continuar a investigar, buscando os mecanismos íntimos de suas ações.

Nota-se, em muitos dos sujeitos desta pesquisa, que os modelos construídos não objetivam necessariamente explicar, mas, simplesmente, fazer um controle de variáveis muito mais relacionadas à descrição do fenômeno do que à sua explicação. Esses modelos (descritivos) são elaborados muito rapidamente, na mesma velocidade que serão descartados. Nota-se, também, que alguns sujeitos parecem elaborar esses modelos descritivos durante as próprias entrevistas. Outros afirmam já terem pensado no assunto antes, mas, por um outro motivo, acabaram abandonando a problemática. De certa forma, isso denuncia o ensino baseado na informação enquanto deveria visar à compreensão. Muitos sujeitos afirmam que leram ou que ouviram seus professores falarem sobre um valor limite da velocidade para a validade da teoria newtoniana. Parece-me claro que, na sala de aula, muitos professores consideram a transmissão de informações uma prática normal e suficiente da ação docente, não se preocupando com a compreensão, por parte dos alunos, dos conteúdos que almeja ensinar e da necessidade de apropriar-se dos mecanismos das ações próprias para lograr tal objetivo.

Isso se mostra frutífero no campo da aprendizagem e, portanto, do ensino, em especial no de Física. A teoria sucessora não deve ser ensinada como um constructo completamente novo sem relação com a teoria antecessora. A exigência de uma nova teoria surge no momento em que a teoria vigente não consegue mais explicar novas situações, integrar dados novos. A dificuldade de o sujeito compreender as causas da não aplicabilidade da teoria vigente às novas situações é o ponto de partida para sua reelaboração ou até da elaboração de uma nova teoria. Afinal, quando as regulações automáticas do sistema cognitivo não dão mais conta de responder aos novos dados assimilados, urge ultrapassá-las com regulações ativas; é necessária, para isso, uma atividade acomodadora que é fonte de novidades.

A análise dos dados mostrou uma evolução dos modelos explicativos que têm por função compreender a realidade física. Desde os sujeitos que buscavam explicar os novos dados exclusivamente com o modelo baseado nos conceitos newtonianos, passando pelos sujeitos que distinguiam dois modelos explicativos ao mesmo tempo em que distinguiam duas

realidades, até os sujeitos que relacionavam os dois modelos explicativos por meio de uma totalidade que permitia compreender o grau de generalização de cada modelo, ficou claro o papel da novidade atingida pela ação do sujeito. Propor situações para que os sujeitos ajam e desafiar sua consciência fazendo perguntas crescentes em complexidade deve ser entendido como objetivo não somente do Método Clínico, mas também da ação docente em sala de aula. Emerge dali a necessidade de termos professores conscientes de suas práticas docentes, culminando em metodologias intencionais, objetivando o desenvolvimento cognitivo dos aprendizes por meio de atividades que busquem, para muito além da transmissão, a compreensão.

Einstein elabora a TRE tomando como verdades os postulados da constância da velocidade da luz e de que todas as leis da natureza são as mesmas para qualquer referencial inercial. Parece haver a compreensão, por parte dos professores de Física, que o aluno, objetivando compreender a TRE, deve aceitar os dois postulados. O aceite, na visão de tais professores, é visto como premissa sem a qual não há a possibilidade de compreender a TRE. Investigando a definição de postulado, encontrei:

Enquanto os axiomas são evidentes por si e têm de ser admitidos necessariamente, mesmo não sendo demonstráveis, os postulados, apesar de demonstráveis, são assumidos e utilizados sem demonstração. Além disso, o Postulado é uma proposição ainda não admitida ou aceita por aquele a quem é endereçada (ABBAGNANO, 1998, p. 782).

Estariam, esses professores, entendendo a aprendizagem como um ato de aceitação? Devido à influência histórica dos postulados, entendo que sim. Todavia, sendo postulados, isso excluiria a possibilidade do sujeito compreendê-los e estariam fadados à aceitação? Vale lembrar que “Aceitar uma teoria física supõe estabelecer relação entre um ‘quadro teórico’ (ou seja, uma determinada estrutura formal) e um conjunto de ‘situações objetivas’ (quer dizer, um conjunto de objetos e suas relações)” (PIAGET & GARCIA, 2011, p. 277). Com um ensino baseado na busca das causas da elaboração da TRE, poder-se-ia trabalhar de modo que os alunos compreendessem os postulados como necessários para explicar determinados fatos. A aceitação, no âmbito educacional, só deveria acontecer após sua compreensão por parte dos alunos. A compreensão das razões de se elaborar uma nova teoria, como a TRE, possibilita a aceitação dos postulados como verdadeiros, não mais pelo simples fato de aceitar, mas por coerência elaborada pelos próprios alunos.

Compreender a TRE é, com certeza, algo complexo, devido a alguns fatores: trata-se de uma teoria resultante de numerosas abstrações, física, reflexionantes e refletidas, que, por isso, dificulta experimentações pertinentes em sala de aula; além disso, ela contraria muitas das compreensões até então elaboradas pelos estudantes. Se pensarmos que a TRE obrigou a transformação de conceitos básicos da Física, e vistos como imutáveis como o espaço e o tempo, compreendidos, até então, a partir das ideias newtonianas, podemos concordar que se trata de uma elaboração teórica única no campo científico, não apenas nessa ciência. Se analisarmos a TRE sob o ponto de vista de seu distanciamento da realidade concebida por muitos dos estudantes, seria, por exemplo, a teoria newtoniana sobre o espaço e o tempo, menos distanciada da realidade do que a TRE? Se sim, estamos julgando que pensar sobre um espaço homogêneo, absoluto, isotrópico e euclidiano é menos afastado da realidade do que pensar sobre um constructo espaço-temporal indissociável. Uma pode ser tão afastada quanto a outra. Afinal, uma teoria é, por natureza, afastada da realidade, pois é uma construção proveniente da relação entre o sujeito e os fatos. Ou seja, a teoria não vem dos fatos, da realidade física, mas da interação entre sujeito e objeto de conhecimento a ser compreendido. Por isso, entender que ensinar Física é aproximar os alunos da realidade não é suficiente. Ensinar Física é ter como objetivo a compreensão dos alunos sobre uma realidade a ser constituída por eles próprios no movimento entre experimentação e axiomatização, culminando na elaboração de noções, conceitos, modelos, teorias, etc.

Entendo esse processo como válido não somente para os conteúdos relacionados à Física – em especial a mecânica clássica de Newton e a mecânica relativística de Einstein –, mas para diferentes áreas de conhecimento, sejam essas relacionadas às ciências exatas ou às humanas. Afinal de contas, estamos falando do sujeito epistêmico e a forma de construção de conhecimento é a mesma, independente do conteúdo que o sujeito busca compreender.

Analisei, neste trabalho, relações que são construídas entre os modelos explicativos da mecânica clássica de Newton e da mecânica relativística de Einstein. Pretendo, além da divulgação dos resultados para os professores e alunos, originar outros trabalhos tendo como base esta tese. Trabalhos que possibilitem ao professor refletir sobre sua prática em sala de aula, como ele se porta frente aos temas que leciona e à aprendizagem de seus alunos. Especialmente para os professores de Física, tenho o interesse de salientar a importância de se trabalhar com seus alunos conteúdos que abordam os referenciais inerciais e a evolução das teorias na Física, objetivando metodologias de ensino não compartimentalizadas, ou seja, que relacionem os vários assuntos contidos em uma mesma disciplina.

REFERÊNCIAS

ABBAGNANO, N. *Dicionário de filosofia*. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

AYALA FILHO, A. ; FREZZA, J. *A Construção de um Perfil Conceitual de Referencial na aprendizagem da Teoria da Relatividade*. In: II Encontro Estadual de Ensino de Física, 2007, Porto Alegre. Livro de Atas do II E.E.E.F., 2007.

AYALA FILHO, A. *A construção de um perfil para o conceito de referencial em Física e os obstáculos epistemológicos a aprendizagem da Teoria da relatividade Restrita*. Investigações em Ensino de Ciências – v. 15(1), pp. 155-179, 2010.

BACHELARD, G. *A filosofia do não – filosofia do novo espírito científico*. Lisboa: Presença, 1987.

DOMINGUES, D. C. *A formação do conhecimento físico: um estudo da causalidade em Jean Piaget*. Niterói: EDUFF; Rio de Janeiro: UNIVERTA, 1992.

EINSTEIN, A. *The meaning of relativity*. Princeton: Princeton University Press, 1921.

EINSTEIN, A. *Generalization of Gravitation Theory*. Princeton: Princeton University Press, 1953.

EINSTEIN, A. *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

EINSTEIN, A. *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*. In: STACHEL, J. (Ed.) O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física. Rio de Janeiro: UFRJ, p117-141, 2005a.

EINSTEIN, A. *A Inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?* In: STACHEL, J. (Ed.) O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física. Rio de Janeiro: UFRJ, p117-141, 2005b.

FREZZA, J. *Noções de Referencial Inercial: um estudo de Epistemologia Genética com alunos de Física*. Porto Alegre: UFRGS, 2011. Dissertação de Mestrado.

FREZZA, J. ; AYALA FILHO, A. *Os Obstáculos Epistemológicos na aprendizagem da Teoria da Relatividade e a Noção de Perfil Conceitual de Referencial*. In: XVI Congresso de

Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: Livro de Atas do XVI CIC, 2007.

FREZZA, J. ; DAMASCENO, R. ; AYALA FILHO, A. *Investigação dos obstáculos epistemológicos apresentados por alunos de uma disciplina introdutória à Teoria da Relatividade Restrita*. In: XV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: Livro de resumos do XV CIC, 2006a.

FREZZA, J. S. ; DAMASCENO, R. ; AYALA FILHO, A. *A noção de obstáculo epistemológico no contexto da Teoria da Aprendizagem Significativa*. In: XV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: Livro de resumos do XV CIC, 2006b.

JAMMER, M. *Conceitos de espaço: a história das teorias do espaço na física*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2010.

LEITE, B. *Piaget e a Escola de Genebra*. São Paulo: Cortez, 1995.

NEWTON, I. *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I*. São Paulo: Edusp, 2012.

PARRAT-DAYAN, S. *La teoría de Piaget sobre la causalidad*. In Moreno Marimón, M. et al. *Conocimiento y Cambio*. Barcelona: Paidós, 1998.

PIAGET, J. *Recherches sur la contradiction: Les différentes formes de la contradiction*. Paris: Presses Universitaires France, 1974

PIAGET, J. *A equilibração das estruturas cognitivas. Problema central do desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Zahar, 1976.

PIAGET, J. *A tomada de Consciência*. São Paulo: Melhoramentos/Edusp, 1977.

PIAGET, J. *Fazer e compreender*. São Paulo: Melhoramentos, 1978.

PIAGET, J. *A evolução intelectual da adolescência: a vida adulta*. Tradução de Tania Beatriz Iwaszko Marques e Fernando Becker. Porto Alegre: UFRGS. Faculdade de Educação, 1993.

PIAGET, J. *Abstração Reflexionante: relações lógico-aritméticas e ordem das relações espaciais*. Porto Alegre: Artes Médicas, 1995.

PIAGET, J. *A noção de tempo na criança*. Rio de Janeiro: Record, 2002.

PIAGET, J. *A representação do mundo na criança*. São Paulo: Ideias & Letras, 2005.

PIAGET, J. ; GARCIA, R. *Las explicaciones causales*. Barcelona: Barral Editores, S. A., 1971.

PIAGET, J.; INHELDER, B. *A representação do espaço na criança*. Porto Alegre: Artes Médicas, 1993.

POINCARÉ, H, *Science and Method*. Londres: COSIMO, 2010.

RAMOZZI-CHIAROTTINO, Z. *Psicologia e Epistemologia Genética de Jean Piaget*. São Paulo: EPU, 1988.

RIEMANN, B. Sobre as hipóteses que servem de fundamento à geometria. Tradução de Carlos Antonio Medeiros Saldanha. *Revista Trans/Form/Ação*. São Paulo, 11:89-99, 1988.

ROCHA, J. F (Org.). *Origens e evolução das ideias da Física*. Bahia: EDUFBA, 2002.

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

STACHEL, J. *O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

VILLANI, A. e PACCA, J.L.A.. *Spontaneous reasoning of graduate students*. International Journal Science Education v.12, n.5, 1990.

WEINBERG, S. *Os três primeiros minutos – uma análise moderna da origem do universo*. Potugal: Gradiva, 2002.