

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA, INSTITUTO DE
BIOCIÊNCIAS, FACULDADE DE EDUCAÇÃO

DANILO CARDOSO

**“A Complementaridade dos Pensamentos Narrativo e
Matemático na Geração da Teoria da Relatividade Geral”**

SÃO PAULO
2015

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA, INSTITUTO DE QUÍMICA, INSTITUTO DE
BIOCIÊNCIAS, FACULDADE DE EDUCAÇÃO

DANILO CARDOSO

“A Complementaridade dos Pensamentos Narrativo e Matemático na
Gestação da Teoria da Relatividade Geral”

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO
INSTITUTO DE FÍSICA, AO INSTITUTO DE QUÍMICA,
AO INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS E À FACULDADE DE
EDUCAÇÃO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO,
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENSINO DE CIÊNCIAS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENSINO DE FÍSICA

ORIENTADOR: PROF. DR. IVÁ GURGEL

SÃO PAULO
2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

-
-
-

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Cardoso, Danilo

A complementaridade dos pensamentos narrativo e matemático na
gestação da teoria da relatividade geral. São Paulo, 2015.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química
e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Ivã Gurgel.

Área de Concentração: Ensino de Ciências (Modalidade:
Física)

Unitermos: 1. Física – Estudo e ensino; 2. Narrativa; 3. Matemática – Estudo e
ensino; 4. Relatividade geral – Estudo e ensino.

USP/IF/SBI-039/2015

Nome: CARDOSO, Danilo

Título: A Complementaridade dos Pensamentos Narrativo e Matemático na
Gestação da Teoria da Relatividade Geral

Dissertação apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências

Área de concentração: Ensino de Física

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____
Julgamento: _____ Assinatura: _____

*“Guarda-me, como a menina dos seus olhos. Ela é a tal,
sei que ela pode ser mil, mas não existe outra igual”.*
Para Marília, minha amada.

AGRADECIMENTOS

É muito difícil lembrar de tod@s que merecem agradecimentos ao final de um trabalho, cujo desenvolvimento se estendeu por um período de tempo considerável, em que muitas coisas aconteceram (tanto no âmbito acadêmico, como pessoal). Esta dificuldade, no entanto, não impossibilita lembrar-me de algumas pessoas específicas. Como seria de se imaginar, o primeiro a ser lembrado é o orientador do trabalho. Mas, sinceramente, o Professor Ivã Gurgel merece destaque não apenas por sua excelência acadêmica, essencial para o desenvolvimento deste trabalho, mas por sua postura humanista, por sua ética, sua coerência, sua gentileza. Enfim, agradeço a sorte de meu caminho poder ter “topado” com o do Professor Ivã, com quem aprendi e aprendo muito, quem me faz acreditar, através de suas ações, que sonhar com um mundo melhor pode não ser uma simples utopia.

Agradeço às Professoras Isabel Martins e Maria José de Almeida pela participação empenhada no exame de qualificação desta dissertação. Suas críticas e orientações foram muito valiosas.

Agradeço fortemente ao amigo André Noronha. Genial. O André é para mim, desde a época de graduação, uma referência para os assuntos acadêmicos. Além, é claro, de uma grande afinidade pessoal, que torna nossa relação bastante fraternal. Costumo brincar que em muitas ocasiões o André foi uma espécie de co-orientador da minha pesquisa.

Agradeço aos integrantes do grupo TeHCo (Grupo de Teoria e História do Conhecimento Científico e Escolar): Alexandre Bagdonas, Alex Coelho, André Noronha (de novo), Felipe Velasquez, Gabriela Bugelli, Helton Martinez, Ivã Gurgel (de novo), Marcia Saito, Maristela Rocha, Sofia Basilio, Renan Milnitsky, Yuri Machado. Participar deste grupo de pesquisa está sendo uma experiência muito enriquecedora. O interesse por debater questões de fundamentos, o cuidado e rigor com a leitura dos textos estão sendo, certamente, muito valiosos para mim.

Agradeço aos colegas de graduação: Rodrigo Correia, Robson Sobral, Florindo Novaes, Daniel Rodrigues, com quem mantenho contato sadio até hoje.

Agradeço à minha família. Meu pai e minha mãe, por terem me incentivado tanto a trilhar um caminho que eles mesmos não puderam conhecer. À minha esposa que, embora não compreenda muito sobre o que eu faço, sempre me deu apoio para que eu continuasse meu caminho dentro da Universidade. Seu apoio além da academia, com certeza, é ainda mais valioso.

Agradeço fortemente à sociedade brasileira, especialmente aos trabalhadores que ganham tão pouco, mas ainda assim são taxados com impostos que são destinados, dentre outras coisas, à Universidade (sem saber exatamente que tipo de retorno podem receber). Este grande esforço da sociedade permitiu que eu pudesse desfrutar de bolsa de apoio à pesquisa da CAPES, além de toda a estrutura da Universidade. Espero, sinceramente, poder retribuir o esforço empreendido em minha formação. Muito obrigado trabalhadores brasileiros.

Resumo

CARDOSO, D. **A Complementaridade dos Pensamentos Narrativo e Matemático na Geração da Teoria da Relatividade Geral**. 2015. 137 f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Este trabalho parte do pressuposto de que investigar as linguagens e pensamentos envolvidos nos processos de criação científica, no processo de interpretação do cientista frente aos fenômenos da natureza, pode nos indicar como trabalhar a ciência em sala de aula de maneira que as características epistemológicas deste conhecimento sejam levadas em consideração. Com isto, este trabalho toma uma perspectiva epistemológica. Quando pensamos no ensino básico, em particular, temos a indicação de que uma das dificuldades enfrentadas pelos alunos está relacionada à formalização do conhecimento científico. Isto é ainda mais forte na física, uma vez que este conhecimento tem uma relação muito próxima com a matemática. Mas qual é o papel epistemológico da matemática para a física? O cientista é capaz de interpretar fisicamente a natureza somente usando linguagens e pensamentos formais, especialmente estruturados pela matemática? Nossa hipótese é que a resposta a essa questão é negativa. Encontramos nas ideias do psicólogo Jerome Bruner uma forma de encaminhar nossa discussão. A partir das ideias dele, e do nosso anseio por investigar se pensamentos e linguagens que não são estritamente formais desempenham papel importante na construção da física, levantamos a seguinte questão: Qual o papel das narrativas e da matemática na construção da física? Para delinear uma resposta possível a esta questão, tomamos como contexto da nossa pesquisa alguns “capítulos” da construção da Teoria da Relatividade Geral. Nossa investigação mostrou que experimentos mentais importantes no desenvolvimento desta teoria foram construídos a partir dos pensamentos narrativo e matemático. Entendemos que estes dois modos de pensamentos se apresentaram de maneira complementar no contexto estudado.

Palavras-chave: Narrativas, Matemática, Relatividade Geral

Abstract

CARDOSO, D. **The Complementarity of Narrative and Mathematical Thoughts in Theory of General Relativity Gestation**. 2015. 137 f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

This work assumes that investigate the language and thoughts involved in scientific processes of creating, in the scientist process of interpretation facing the nature phenomena, can reveal how to work the science in the classroom so that the epistemological features of this knowledge are taken into account. Taking this into account, our work takes an epistemological perspective. When we think in high school, in particular, we have the indication that one of the difficulties faced by students is related to the formalization of scientific knowledge. This is even stronger in physics, which mathematics plays important role. But what is the epistemological role of mathematics to physics? The scientist is able to physically interpret nature only using formal languages and thoughts, especially structured by mathematics? Our hypothesis is that the answer to this question is negative. We find the psychologist Jerome Bruner ideas a way to send our discussion. From his ideas, and our longing to investigate whether thoughts and languages that are not strictly formal play an important role in building physics, raised the question: What is the role of narrative and mathematics in physical construction? To outline a possible answer to this question, we take as the context of our research some "chapters" of the construction of the General Theory of Relativity. Our investigation has shown that important thought experiments in the development of this theory were built from the narrative and mathematical thoughts. We understand that these two modes of thought presented in a complementary manner in the context studied.

Keywords: Narratives, Mathematics, General Relativity

Sumário

Apresentação	13
Capítulo 1	16
Introdução	16
1.1 Perspectiva educacional da pesquisa	16
1.2 Rápida apresentação de diferentes perspectivas dos estudos de linguagem no ensino de ciências	20
1.2.1 Jay Lemke: uma perspectiva semiótica social.....	20
1.2.2 Análise de discurso.....	23
1.2.3 Clive Sutton: um viés epistemológico	25
1.3 Delineando a questão de pesquisa	29
Capítulo 2	33
Linguagem, pensamento e visão de mundo	33
2.1 Concepção Referencial da Linguagem e a “Terapia” de Wittgenstein.....	33
2.2 O papel da Matemática na construção e no ensino da Física	40
2.2.1 A relação entre matemática e física na pesquisa em ensino	40
2.2.2 Matemática e Física: uma relação profunda	48
2.3 Narrativas como modo de pensamento e seu papel no ensino de ciências ...	56
2.3.1 Algumas Pesquisas sobre Narrativas no Ensino de Ciências.....	57
2.3.2 Bruner e o Pensamento Narrativo.....	64
Capítulo 3	77
Historiografia da ciência como metodologia de pesquisa	77
3.1. Considerações historiográficas.....	77
3.2 História e formalismo da Relatividade Geral.....	80

Capítulo 4.....	99
Investigando o papel da Matemática e da Narrativa na Geração da TRG. 99	
4.1 Princípio de Equivalência.....	99
4.2 Distorção do Espaço-Tempo.....	112
4.3 Cosmologia einsteiniana.....	118
Capítulo 5.....	124
Considerações Finais	124
Referências	129

Apresentação

A dissertação que será apresentada ao longo dos próximos capítulos terá como foco central uma discussão epistemológica do conhecimento físico. Nossas questões são inspiradas nas discussões sobre linguagem no ensino de ciências. Há muitos anos, pesquisadores da área de ensino de ciências têm demonstrado o interesse por apropriar-se das discussões a respeito da linguagem e, de diferentes maneiras, aproximar essas discussões dos anseios de sua área de pesquisa, o ensino.

Por tratar-se de uma temática bem consolidada na nossa área, surgiram diferentes perspectivas que buscam aproximar as questões sobre linguagem e os interesses do ensino de ciências. Na introdução desta dissertação destacamos três dessas perspectivas: 1- Semiótica social, em que discutimos algumas ideias do autor Jay Lemke; 2- Análise do Discurso que, principalmente no Brasil, tem grande interesse de pesquisadores do ensino; 3- Viés epistemológico, cujo autor Clive Sutton foi a principal referência para a apresentação desta perspectiva. Nossa pesquisa pretende-se uma contribuição a esta terceira perspectiva, a epistemológica.

No ensino de ciências, em particular no ensino de física, tem sido bastante discutido os aspectos formais da linguagem da ciência. Há ampla discussão, por exemplo, sobre o papel da matemática na estruturação da física. Considerando este contexto, levantamos a seguinte questão: *Pensamentos/linguagens que não são estritamente formais podem desempenhar papel importante na construção da ciência?* Considerando, também, a tese de Sutton (1998), de que o cientista utiliza a linguagem como sistema interpretativo, isto é, como meio de criação de sentido, formulamos a questão: *Que tipo de linguagem o cientista usa para interpretar o mundo?* Colocada de outra maneira: *quais linguagens estruturam o pensamento do cientista para interpretar a natureza?*

O encaminhamento dado a essas questões foi inspirado em um psicólogo estadunidense chamado Jerome Bruner (1915-). Este autor propõe que os seres

humanos apresentam dois tipos básicos de pensamento: *pensamento lógico científico* e *pensamento narrativo*. As discussões de Bruner não são estritamente linguísticas, uma vez que seu interesse, de maneira geral, é a constituição do pensamento. No entanto, Bruner considera que pensamento e linguagem apresentam uma relação inextricável. Consideramos que seu interesse pela formação do pensamento nos possibilitou um olhar epistemológico para as questões que levantamos.

Considerando, então, as questões que nos interessava, particularmente se linguagens/pensamentos não formais desempenham papel importante na construção da física e, considerando ainda, as ideias propostas por Bruner, formulamos a principal pergunta desta pesquisa: *Qual o papel das Narrativas e da Matemática na construção da Física?* Para encaminhar esta questão tomamos a historiografia da ciência como metodologia de pesquisa, selecionando o período de formulação da Teoria da Relatividade Geral como contexto da pesquisa.

Além da introdução, que apresenta as questões discutidas acima, esta dissertação foi estruturada em mais quatro capítulos. O capítulo 2 foi destinado à fundamentação teórica da pesquisa. Este capítulo foi dividido em três seções principais. A primeira seção discute a linguagem do ponto de vista filosófico. Esta discussão é centrada, particularmente, na crítica do filósofo austríaco Ludwig Wittgenstein à concepção referencial da linguagem. Na segunda seção discutimos o papel da matemática na física, sob um ponto de vista epistemológico. Apresentamos nesta seção, ainda, alguns trabalhos da área do ensino de ciências que se interessam pelo papel da matemática na física e em seu ensino. A terceira seção foi destinada às discussões sobre narrativas. Primeiro apresentamos alguns trabalhos do ensino de ciências que têm se interessado pelas narrativas. Em seguida, apresentamos a concepção de narrativa que foi adotada nesta pesquisa: narrativas como modo de pensamento, de acordo com as ideias de Bruner.

O capítulo 3 foi destinado à apresentação e discussão de alguns capítulos históricos da Teoria da Relatividade Geral. Essa discussão histórica focou,

principalmente, nas questões conceituais e formais do processo de construção da teoria.

No capítulo 4 apresentamos a análise da pesquisa. Esta análise consistiu, em linhas gerais, da leitura de textos originais de Einstein: artigos, cartas, livros de divulgação. Focamos, especialmente, na análise de alguns experimentos mentais que foram essenciais para a elaboração da teoria.

Por fim, no capítulo 5, discutimos os resultados da pesquisa e chegamos a algumas conclusões. A principal delas foi perceber que os pensamentos narrativo e matemático se apresentaram, no contexto estudado, de maneira complementar.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Perspectiva educacional da pesquisa

De acordo com as perspectivas educacionais mais recentes, não podemos, especialmente na escola básica, ter espaço para um ensino dogmático, exclusivamente pautado na memorização de conceitos, ou em métodos de resolução de exercícios que não têm nenhum significado para o aluno. Em outras palavras, devemos superar um ensino cujo objetivo central seja a transmissão do conteúdo científico por si só. Da mesma maneira, deve ser superado o ensino propedêutico, preocupado em preparar os estudantes da escola básica para eventuais carreiras científicas ou afins. Estas têm sido pautas gerais da pesquisa em ensino de ciências há décadas.

Muitos pesquisadores na atualidade, em contrapartida à concepção educacional apontada acima, têm defendido que o objetivo do ensino de ciências da escola básica deve ser o de promover a alfabetização/letramento científico¹ dos estudantes. Embora haja concordância de que devemos superar a concepção tradicional² de educação, não há consenso, no entanto, sobre o que significa ser alfabetizado cientificamente (ROBERTS, 2007, p. 729). Ainda assim, existem apontamentos gerais como, por exemplo, de que a alfabetização científica envolve “habilidades e hábitos mentais requeridos para construir entendimentos da ciência” (YORE, 2003, p.690, tradução livre). Sasseron e Carvalho (2011), a partir de uma revisão da literatura, apresentaram o que chamaram de *Eixos Estruturantes da Alfabetização Científica*, organizados da seguinte maneira:

¹ Há certa tensão entre os autores que optam pelos termos Alfabetização e Letramento. Como não pretendemos inscrever esta pesquisa no contexto destes trabalhos, optamos por não aprofundar nas discussões a este respeito.

² Tradicional no sentido de uma educação volta à memorização, à resolução de exercícios, descontextualizada, etc.

- *Compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais;*
- *Compreensão da natureza das ciências e dos fatores éticos e políticos que circundam sua prática;*
- *Entendimento das relações existentes entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente.*

Esses eixos estruturantes indicam, de maneira geral, os objetivos mais amplos da alfabetização científica. O enfoque nas discussões que transcendem os conteúdos da ciência é notável. Contudo, considerar as discussões mais amplas relacionadas ao conhecimento científico não deve significar que as características epistemológicas próprias deste conhecimento possam ser desconsideradas. O primeiro eixo, ainda que de forma genérica, aponta isto. Ser capaz de compreender minimamente as características próprias da ciência é condição para articulá-la às questões mais amplas de interesse de um cidadão. Stephen Norris e Linda Philips (2003) propõem que existem dois sentidos principais para a alfabetização científica: Um *sentido fundamental* – “ler e escrever quando o assunto é ciência” – e um *sentido derivado* – “ser bem informado, versado, e educado em ciências” (NORRIS & PHILIPS, 2003, p.224, tradução nossa). Eles argumentam que o *sentido fundamental* é central para a alfabetização científica, pois ele seria condição necessária para o desenvolvimento de outras habilidades, relacionadas às situações que não são estritamente científicas. Isto é, para que o aluno possa exercer criticamente o pensamento científico para discutir questões sociais é necessário que tenha desenvolvido o *sentido fundamental*.

Ático Chassot (2003) defende que “a ciência pode ser considerada como uma linguagem construída pelos homens e pelas mulheres para explicar nosso mundo natural” (CHASSOT, 2003, p. 91). O autor argumenta que elaborar explicações a respeito do mundo natural “[...] é descrever a natureza numa linguagem dita científica” (CHASSOT, 2003, p.93). Então, conclui que “propiciar o entendimento ou a leitura dessa linguagem é fazer alfabetização científica” (*idem*).

Considerando o contexto educacional apresentado, percebe-se que investigar as diferentes formas de pensamento e linguagem necessárias ao desenvolvimento do conhecimento científico pode constituir-se como um caminho legítimo para a área da pesquisa em ensino de ciências, uma vez que investigações deste tipo pode nos proporcionar possibilidades de articular a linguagem da ciência em sala de aula considerando suas características próprias, isto é, suas características epistemológicas.

A educação científica há muito tempo tem se interessado em investigar o papel da linguagem no processo de ensino e aprendizado de ciências em sala de aula (ESPINET et. al, 2012, p. 1385). Para alguns autores, especialmente aqueles ligados às teorias sociolinguísticas, aprender ciências é equivalente a aprender a *falar ciências* (LEMKE, 1997). Leader (*apud* ALMEIDA, 1999) afirma que “cada disciplina tem sua linguagem, e quer ele queira quer não, todo professor inicia seus alunos no uso de alguma forma dessa linguagem”. Acreditamos que uma investigação epistemológica interessada nas linguagens e pensamentos articulados pelos próprios cientistas pode nos oferecer indicações de como trabalhar a ciência em sala de aula, como uma parte da busca em alfabetizar cientificamente nossos alunos.

A linguagem não só é o meio pelo qual podemos nos comunicar e, portanto, o meio que dispomos para ensinar e aprender, como também é a maneira que temos para construir conhecimento, para dar significado ao mundo que nos cerca. Compartilhar determinada linguagem significa, sobretudo, compartilhar visões de mundo, visto que a “linguagem age como uma interface entre o mundo e a mente, entre a realidade e as pessoas” (ESPINET et al., 2012, p.1389, tradução livre). Embora defendamos que é através da linguagem que somos capazes de conhecer o mundo, devemos alertar que hipóteses mais radicais neste sentido, como a de Sapir-Whorf, cuja tese principal é que a língua nativa de uma pessoa modelaria completamente sua percepção do mundo, são atualmente largamente desacreditadas (CALRSEN, 2007, p.64).

Embora as pesquisas em ensino de ciências que se interessam por aspectos relacionados à linguagem sejam muito variadas e pautadas em diferentes referências teóricas, apresentam, aparentemente, um apontamento comum: para a necessidade de nos apropriarmos de visões mais complexificadas e adequadas sobre o funcionamento da linguagem. Pietrocola (2005, p. 326), por exemplo, aponta que “parte significativa das dificuldades do aprendizado das ciências se dá pela falta de consciência, por parte de professores e estudantes, sobre a dimensão interpretativa da linguagem científica”. Tal apontamento está embasado, principalmente, nos trabalhos de Clive Sutton, autor que defende que devemos reduzir a ênfase dada, no ensino das ciências, à linguagem como método de transmitir informação e que devemos aumentar a ênfase à linguagem como sistema interpretativo de criação de sentido (SUTTON, 1998). Nota-se, pelas considerações de Pietrocola (2005) e Sutton (1998), que entender o funcionamento da linguagem da ciência é indispensável para o seu ensino.

Investigar a linguagem da ciência e os diferentes modos de pensamento apresentados pelos cientistas não é novidade na nossa área de pesquisa. Considerando o contexto da Física, em particular, destacam-se os pensamentos e linguagens formais envolvidos na sua construção. As analogias formais e materiais no desenvolvimento dos modelos científicos (SILVA, 2007) e o papel da linguagem matemática no pensamento físico (KARAM, 2012; PIETROCOLA, 2002) são exemplos de pesquisas com este viés. Apesar de concordar que as linguagens e pensamentos formais são fundamentais para a construção e estruturação da ciência, acreditamos ser legítimo levantar a seguinte questão: *Pensamentos/linguagens que não são estritamente formais podem desempenhar papel importante na construção da ciência?* Nossa hipótese é que pensamentos não formais, isto é, aqueles que não apresentam uma estrutura lógica e matemática, também desempenham papel fundamental na construção de novas ideias pelos cientistas.

Antes de formularmos a questão de pesquisa de maneira mais precisa, apresentaremos algumas perspectivas de estudo da linguagem no ensino de ciências, de maneira a mostrar que a dimensão epistemológica da linguagem não

é o foco principal de muitas perspectivas de pesquisa em linguagem no ensino de ciências, embora esse viés exista e tenha espaço na literatura. Essas pesquisas, embora não apresentem a abordagem epistemológica como enfoque principal (que é o que mais nos interessa nesta pesquisa), permite-nos pensar questões que envolvem o complexo ato de ensinar, de diferentes pontos de vista.

Vale adiantar que a apresentação de algumas das perspectivas de estudo sobre linguagem no ensino de ciências não se pretende uma revisão ampla, nem aprofundada sobre o tema. O objetivo é justificar nossa opção por uma perspectiva epistemológica. Dentre as perspectivas que apresentaremos está uma em que o viés é claramente epistemológico, no espírito desta pesquisa. Esta perspectiva será representada particularmente pelas ideias de Clive Sutton.

1.2 Rápida apresentação de diferentes perspectivas dos estudos de linguagem no ensino de ciências

Fizemos uma breve revisão de algumas perspectivas de pesquisa em linguagem no ensino de ciências. Esta revisão nos indicou que, em geral, os pesquisadores partem de discussões mais amplas sobre a linguagem e investigam como essas discussões podem ser travadas na ciência e quais seriam os desdobramentos para o seu ensino.

1.2.1 Jay Lemke: uma perspectiva semiótica social

A preocupação com questões sobre linguagem no ensino de ciências é relativamente antiga. Um autor reconhecido nesta temática é Jay Lemke, com contribuições nesta temática desde a década de oitenta (GURGEL, 2010, p. 57). O livro *Talking Science*, de 1990, é uma das grandes obras de Lemke, em que o autor sintetiza boa parte de suas ideias. A principal tese deste livro “é que o domínio de uma matéria especializada como a ciência é em grande medida o domínio de suas formas especializadas de utilização da linguagem” (LEMKE, 1997, p. 37). Carlsen reconhece a importância desta obra em artigo para o *Handbook of Research on Science Education*, de 2007, e diz que ela “é um guia para a análise do discurso existente em sala de aula” (CARLSEN, 2007, p. 61).

Lemke apresenta uma visão semiótica social de ensino (CARLSEN, 2007; GURGEL, 2010), defendendo que aprender ciências significa aprender a se comunicar cientificamente, aprender a “falar ciências” (LEMKE, 1997). O autor considera (LEMKE, 1997) que ensinar, aprender e fazer ciência são processos sociais, que são feitos por membros de comunidades sociais (grandes ou pequenas, como uma sala de aula). Para ele, os professores de ciências, por exemplo, pertencem a uma comunidade de pessoas que falam a linguagem da ciência. Já os alunos, pelo menos por um período, não o fazem. Os professores utilizam a linguagem científica para dar significado particular a um tema abordado, o que não necessariamente acontece com os alunos, que podem usar sua própria linguagem para dar significado àquele mesmo tema. Para Lemke, esta é uma das razões pela qual comunicar ciência pode ser tão difícil (LEMKE, 1997, p.12). Assim, o autor propõe que “temos que aprender a ver o ensino de ciência como um processo social e introduzir os alunos, ao menos parcialmente, dentro desta comunidade que ‘fala ciência’” (LEMKE, 1997, p.13).

É importante salientar que, para Lemke, o “falar ciências”, ou as “formas especializadas de utilização da linguagem”, extrapola o ato de falar sobre algum assunto científico.

Falar ciência não significa simplesmente falar acerca da ciência. Significa fazer ciência através da linguagem. Falar ciência significa observar, descrever, comparar, classificar, analisar, discutir, fazer hipóteses, teorizar, questionar, desafiar, argumentar, desenhar experimentos, seguir procedimentos, julgar, avaliar, decidir, concluir, generalizar, informar, escrever, ler e ensinar através da linguagem da ciência. (LEMKE, 1997, pp. 11-12)

Lemke defende que o significado dos termos científicos não pode ser compreendido de maneira isolada. Isto é, o significado surge do uso desses termos relacionando-os uns com os outros em uma ampla variedade de contextos. Desta maneira, não basta conhecer palavras ou conceitos isolados, pois, a partir desta perspectiva, o significado do todo é maior que a soma do significado de suas partes.

É possível que o aluno conheça as definições das seguintes palavras: ‘elétron’, ‘elemento’ e ‘orbital’, mas isso não significa que seja capaz de utilizar as três palavras corretamente dentro de uma oração ou de explicar como seus significados se relacionam. Para fazer isto, se requer ter o conhecimento adicional de como se utilizam estas palavras ao falar cientificamente. (LEMKE, 1997, p.28)

Lemke desenvolve um conceito importante para sustentar seu ponto de vista, de que os termos não podem ser compreendidos isoladamente. Trata-se do conceito de “padrão temático”. Em um dos casos estudados no livro *Talking Science*, os orbitais atômicos foram considerados como um item temático. Grosso modo, o padrão temático determina/baliza como os conceitos são utilizados dentro de determinado conteúdo (tema científico).

Um padrão temático é uma forma de visualizar a rede de relações entre os significados dos termos chaves em uma linguagem de um tema particular. Esses termos e seus sinônimos equivalem a formas de expressar os itens temáticos do padrão. A gramática e as formas retóricas utilizadas a falar e escrever proporcionam os meios de expressar as relações semânticas entre esses itens. [...] os termos adquirem seus significados a partir das formas em que são utilizados”. (LEMKE, 1997, p.112)

Em suma, Lemke, nesta importante obra, cuja perspectiva enquadra-se na semiótica social, defende que o papel do ensino de ciências deveria ser o de ensinar aos estudantes como utilizar a linguagem científica segundo os padrões semânticos da ciência, mas sem perder de vista os propósitos próprios dos alunos, como: “falar ciência em classe, nos exames, a chegar à solução de um problema (em voz alta, ou em privado), a escrever ou falar sobre assuntos relacionados com a ciência”. (LEMKE, 1997, p. 113). Contudo, embora ele faça esses importantes apontamentos sobre o papel da linguagem no processo de ensino e aprendizado de ciências, partindo de uma visão que considera a linguagem em seus aspectos mais amplos, como seu papel em atividades como observar, descrever, argumentar, etc. consideramos que é uma perspectiva que não tem como foco uma abordagem epistemológica, no sentido de buscar compreender nuances do funcionamento da linguagem da ciência na construção de ideias/conceitos científicos.

1.2.2 Análise de discurso

Outro viés de pesquisa em linguagem e ensino de ciências que tem se destacado ao longo dos últimos anos são aquelas ligadas à análise de discursos (AD), especialmente a análise de discurso de linha francesa, cujos autores como Michel Foucault, Michel Pêcheux e Oswald Ducrot são destacadas referências. Entre as referências brasileiras destacamos Sírio Possenti e Eni Orlandi. O grupo gepCE (Grupo de Estudo e Pesquisa em ciência e Ensino), coordenado pela Professora Maria José Almeida, da UNICAMP, tem importante papel nos trabalhos sobre linguagem no ensino de ciências, especialmente na perspectiva da análise de discurso. Os pesquisadores Henrique César da Silva e Suzani Cassiani, que colaboraram com este grupo, têm contribuído constantemente para a produção de conhecimento nesta área.

De maneira geral, podemos afirmar que “a proposta básica da análise de discurso é considerar a relação da linguagem com a exterioridade, ou seja, com as condições de produção do discurso” (ALMEIDA et al, 2001, p.4). Existem alguns pressupostos básicos da análise de discurso, embora haja diferentes tendências de pesquisa. Um deles é a consideração de que todo discurso é uma construção social, não individual, e que só pode ser analisado considerando seu contexto histórico-social, suas condições de produção. Como afirma Pêcheux (1990), todo discurso é pronunciado a partir de *condições de produção* dadas. Assim, ele se conjuga sempre sobre um discurso prévio, sendo esta uma forma de ressuscitar “no espírito dos ouvintes o discurso no qual este acontecimento era alegado, com as ‘deformações’ que a situação presente introduz e da qual pode tirar partido” (Pêcheux, 1990, p.77). Desta forma, como aponta Silva e Almeida (2005, p.4), a autonomia do sujeito na produção dos sentidos é relativa: “quando o sujeito significa, já está significado, pois o lugar de onde significa, um lugar discursivo, é determinado historicamente”. Então, não interessa à análise do discurso saber a intencionalidade do autor, pois “o locutor, num determinado momento de menor controle, deixa emergir um traço que normalmente é instigado a esconder” (POSSENTI, 1988, p.102). Assim, “não se trata de interrogar nem a consciência,

nem o inconsciente do autor, mas o inconsciente da coisa dita” (FOUCAULT *apud* POSSENTI, 1988, p.105).

Os trabalhos em análise do discurso se interessam por contextos mais amplos do que apenas o texto ou fala analisada, sobretudo pelo caráter histórico-social dos discursos. Com isto, considera-se que a linguagem não é “transparente”, ou seja, que o sentido do discurso extrapola o próprio objeto de análise em si.

Os dizeres não são, como dissemos, apenas mensagens a serem decodificadas. São efeitos de sentidos que são produzidos em **condições determinadas** e que estão de alguma forma presentes no modo como se diz, deixando vestígios que o analista de discurso tem de aprender. São pistas que ele aprende a seguir para compreender os sentidos aí produzidos, pondo em relação o dizer com sua exterioridade, suas condições de produção. Esses sentidos têm a ver com o que é dito ali mas também em outros lugares, assim como o que não é dito, e com o que poderia ser dito e não foi. Desse modo, **as margens do dizer, do texto, também fazem parte dele.** (ORLANDI, 1999, p. 30, grifos nossos)

A partir dos pressupostos coerentes com a AD que os autores desta linha pretendem considerar que o discurso de um cientista, embora tenha suas características próprias, tem uma historicidade como qualquer outro (GURGEL, 2010, p.66). Claramente, considerar a ciência como uma construção discursiva não significa que ela se equivalha a outros tipos de discursos. Isto é, tratar a ciência como discurso não é o mesmo que compartilhar uma posição relativista. A este respeito Possenti afirma: “Que a ciência é discurso é certo, mas isso não implica que todos os discursos sejam iguais” (POSSENTI, 1997, p. 10). Defesas desta natureza, a nosso ver, abre a possibilidade de investigações de cunho epistemológico, uma vez que cada discurso apresenta sua especificidade.

Uma das maneiras de se abordar as discussões da AD no ensino de ciências tem sido “através dos estudos de atividades didáticas, mas que buscam, principalmente, pensar a leitura e escrita de textos pelos alunos” (GURGEL, 2010, p. 66), embora as pesquisas com o viés da AD não se restrinjam apenas a isto. Silva e Almeida (2005), por exemplo, abordaram a questão da divulgação da

ciência dentro da escola, de um ponto de vista discursivo. Os autores buscaram identificar contraposições entre o funcionamento de um discurso pedagógico (autoritário, segundo eles) e o discurso da divulgação científica. Os autores apontam possibilidades a serem exploradas nas leituras desses textos de divulgação. A análise deste tipo de texto tem relevância para o ensino de ciências uma vez que “os efeitos de sentidos, da ciência e sobre a ciência, circulam tanto dentro quanto fora da escola” (SILVA & ALMEIDA, 2005, p.2). É importante destacar que esses discursos, produzidos dentro e fora da escola, não são completamente autônomos. Assim, a escola tem um papel importante na relação desses discursos.

[...] pressupomos ser função da escola preparar os estudantes para lidarem com os discursos que circulam em nossa sociedade, porque são constitutivas desses discursos as possibilidades de posições de sujeitos que eles venham a ocupar em sua relação com a ciência, principalmente quando se pensa na escola como agente transformador dessa relação quase hegemônica que os sujeitos estabelecem com a ciência na sociedade atual. (SILVA & ALMEIDA, 2005, p. 2)

A perspectiva da análise do discurso é muito importante, particularmente no sentido de problematizarmos as proposições da ciência, suas condições de produção. Ela nos permite discutir que a ciência, assim como todo o discurso, não é livre de intencionalidades. Contudo, este viés não tem como enfoque principal a epistemologia, não analisa as características da linguagem na construção de ideias e conceitos científicos, embora dê abertura para isto.

1.2.3 Clive Sutton: um viés epistemológico

Clive Sutton, Professor da Escola de Educação da Faculdade de Leicester, no Reino Unido, tem contribuições importantes nos estudos sobre linguagem no ensino de ciências. Destaque para as obras: “*Words, Science and Learning*”, “*Beliefs about Science and beliefs about Language*” e “*New perspectives on Language in Science*”, artigo do *Handbook of Research on Science Education*, de 1998. Dentre as características que chamam atenção nos trabalhos de Sutton, destacamos, especialmente, os questionamentos de cunho epistemológico que ele

faz com relação aos processos que envolvem a linguagem, a exemplo do trecho selecionado a seguir:

O que fazem os cientistas (ou os “filósofos naturais”) em suas investigações? Os estudantes, baseados no senso comum, afirmam que os cientistas “fazem experimentos” e “descobrem” coisas. Eles “encontram fatos”. Se se necessita de linguagem para algo, parece ser simplesmente para que nos contem o que descobriram. Esta é uma história muito incompleta e enganosa sobre o que fazem os cientistas, já que não se valoriza o papel da linguagem na ação recíproca [*entrevue*] de ideias e provas e se omite sua função na construção de ideias novas. Os historiadores e estudiosos da linguagem têm mostrado que esta **[a linguagem] está fortemente implicada no processo de gênese e formulação das novas ideias.** (SUTTON, 2003, p. 22, tradução e grifos nossos)

A principal preocupação de Sutton está relacionada ao uso exagerado da linguagem como “sistema de etiquetagem” no ensino de ciências. Em outras palavras, sua crítica reside no uso exagerado da linguagem como meio de descrição, a despeito de seu uso como meio de interpretação e de criação de sentidos. Estas são duas grandes categorias utilizadas por Sutton: linguagem como *sistema interpretativo* e linguagem como *sistema de etiquetagem*. De maneira simplificada, podemos dizer que a linguagem como sistema de etiquetagem opera em um momento que determinado conhecimento já está relativamente bem consolidado. Uma característica do sistema de etiquetagem é que seu uso parece indicar a ausência/independência de pessoalidade. O sistema interpretativo, por sua vez, além de sugerir um caráter pessoal às afirmações (do tipo: eu penso que; parece-me que), tem a característica de ser provisório, impreciso a princípio, e flexível para tentar captar a mesma ideia de diferentes maneiras (SUTTON, 1997, p.15). O sistema interpretativo estaria mais próximo dos momentos de criação da ciência. Para Sutton, os cientistas criam novas formas de falar ao construir novos conhecimentos, novas maneiras de dar significado ao mundo.

Toda linguagem nova é poética e metafórica em um primeiro momento [...]. Uma imagem nova oferece a possibilidade nova de dar significado a algo, que pode então ser submetida ao juízo e à crítica e à comprovação experimental de suas predições. Toda linguagem nova é interpretativa e, em um grupo de seres

humanos, tem como finalidade comparar e compartilhar interpretações, tentando chegar a acordos sobre a forma como percebemos as coisas (SUTTON, 1997, p.18, tradução nossa).

Reproduzimos abaixo uma tabela feita por Sutton, que sintetiza os dois sistemas de linguagem proposto pelo autor (SUTTON, 1997, p.14, tradução nossa).

Tabela 1 - Tipos de sistemas de linguagem, de acordo com Sutton

Linguagem como Sistema Interpretativo	Linguagem como Sistema de Etiquetagem
(para dar sentido às novas experiências)	(Para descrever, dar conta, informar)
-É claramente o produto de uma pessoa que está dizendo “Eu penso que...” ou “Me parece que...”, “Comecei a pensar se não podia existir um movimento, como se foi, em um círculo” Willian Harvey, sobre o sangue, 1628. “Não escapa a nosso conhecimento que o aparecimento que temos postulado sugere imediatamente um possível mecanismo de copia do material genético” James Watson e Francis Crick, sobre o DNA, 1953.	-É aparentemente independente da pessoa: “O cobre se envolve de negro quando se esquentam” “Os metais sempre se descarregam no cátodo” “O volume de uma determinada massa de gás é inversamente proporcional à pressão” “Sobre a influência de uma força gravitacional, os planetas se movem em órbitas elípticas” “As moléculas de ar estão em constante movimento”
-É analógico ou metafórico: “É como um...” ou “É como se...” ou “Podemos pensar sobre ele como...”	-Parece ser direto e literal, em lugar de imaginativo “Estes são os fatos...”
-É provisório, impreciso ao princípio e flexível para tentar captar a mesma ideia de diferentes maneiras.	“Assim é como é...” É definido e preciso, e necessita utilizar uma palavra exata para

	cada coisa.
Quando a usamos para comunicar parece que estamos: Persuadindo a outros sobre o novo ponto de vista, construindo uma nova comunidade de pensamento	Neste caso parece que estamos: TRANSMITINDO conhecimento e armazenando informação

Para Sutton, há um “desejo” em confinar a ciência na coluna da direita (sistema de etiquetagem) e isso tem sido causado, segundo ele, por uma superexposição às quase certezas, sem apresentar as dúvidas que os cientistas tiveram quando as formularam pela primeira vez. Na opinião do autor, isto consolida a crença de que as descobertas são a base do desenvolvimento da ciência (1997, p.15). O desejo em dar ênfase ao sistema de etiquetagem também teria influência, segundo o autor, do entusiasmo em separar as “opiniões pessoais” dos “fatos da natureza”. Sutton sugere que é a segurança com que usamos a linguagem “factual” na escola a responsável por deixar aos estudantes a impressão de que os cientistas se propõem a “descobrir” fatos sobre o mundo natural, fazendo experimentos e “vendo o que acontece”, em lugar de seguir um processo de esforço imaginativo e de construção laboriosa.

Para Sutton, a visão que se tem da dinâmica interna da ciência, de seus aspectos epistemológicos, está relacionada à ideia que se tem sobre o funcionamento da linguagem.

A imagem popular de ciência apresenta a linguagem como um meio de descrição – para dar conta do mundo tal como é, como um informe objetivo do que acontece, independente dos seres humanos. Mas [...] **a linguagem é mais um meio de por as ideias a prova, para imaginar o que vai acontecer e para interpretar as situações.** (SUTTON, p.14, 1997, tradução e grifos nossos)

A ênfase na linguagem como meio de transmissão de informação pode acarretar problemas ao ensino de ciências, promovendo, eventualmente, visões distorcidas do que é o conhecimento científico. No ensino com tal ênfase, o conhecimento científico é apresentado de maneira exata e estática. Não se

considera seu complexo processo de construção, seu aspecto histórico, social e cultural, negligenciando, entre outras coisas, as diversas contribuições dadas por diferentes cientistas ao longo da história e em diferentes contextos, e o papel desempenhado pela criatividade destes cientistas para construir o conhecimento científico. O ensino que utiliza, exclusivamente, a linguagem como meio de transmissão de informação, ou como sistema de etiquetagem, tende a priorizar uma aprendizagem pautada, principalmente, na memorização dos conceitos, o que é amplamente criticado pelas perspectivas educacionais mais recentes, como apontamos na introdução deste trabalho. Assim, torna-se justo, a nosso ver, o apontamento feito por Sutton. Acreditamos que dar ênfase à linguagem como sistema interpretativo de criação de sentido é indispensável para que o conhecimento científico seja trabalhado em sala de aula respeitando suas características epistemológicas, levando em conta sua dinâmica de funcionamento, seu caráter mutável, histórico, social, cultural e ético. E, principalmente, para que os alunos tenham a possibilidade de utilizar a linguagem da ciência como mais uma forma de dar significado ao mundo que os cercam.

1.3 Delineando a questão de pesquisa

Apresentamos na seção anterior algumas perspectivas de pesquisa em linguagem no ensino de ciências, destacando a abordagem sociolinguística (ou semiótica), a perspectiva da análise do discurso, que tem se consolidado principalmente no Brasil, e ainda pesquisas que tratam a linguagem mais diretamente em um viés epistemológico, que tem relação mais estreita com os interesses deste trabalho.

O principal apontamento proveniente desta última perspectiva se deve à limitação da compreensão da linguagem como sistema de etiquetagem, que estaria atrelada a uma visão limitada do próprio fazer científico. A proposta apresentada por Sutton é que há uma dimensão interpretativa da linguagem, articulada pelo cientista na construção da ciência, como meio de dar sentido ao mundo natural. Assim, construir conhecimento, criar novas visões de mundo,

consiste em formular novas maneiras de falar, conseqüentemente, novas maneiras de interpretar o mundo. Uma questão que podemos fazer a partir deste contexto é a seguinte: *Que tipo de linguagem o cientista usa para interpretar o mundo?* colocada de outra maneira: *quais linguagens estruturam o pensamento do cientista para interpretar a natureza?*

Alguns autores apontam para a grande diferença entre as maneiras de pensar através da ciência e através do senso comum, e que a linguagem utilizada em cada uma dessas situações seria fonte importante de tais diferenças. Pietrocola (2002, p.89) aponta que uma importante diferença é que “ao contrário do que ocorre no cotidiano, a ciência, normalmente, vale-se da Matemática como forma de expressar seu pensamento”. De acordo com este autor, o uso da linguagem Matemática se tornou, ao longo da história da Física, um critério de cientificidade, uma vez que “a incapacidade de expressar propriedades de sistemas em linguagem Matemática inviabiliza mesmo a possibilidade de admiti-las como hipóteses para o debate científico” (PIETROCOLA, 2002, p.89). Assim, considerando a própria identidade epistemológica da Física, a linguagem Matemática teria importante papel em seu ensino. Como aponta Robillota (1985), negligenciar ou dar papel secundário ao formalismo matemático “[...] corresponderia a apresentar aos estudantes uma caricatura pobre da Física, já que esta é estruturada em termos matemáticos e é praticamente impossível saber Física sem dominar essa estrutura” (ROBILLOTA, 1985 *apud* ALMEIDA, 2001, p.3). É importante salientar, no entanto, que saber Matemática de maneira independente do conhecimento físico, não garante a aprendizagem da Física (PIETROCOLA, 2002; REDISH, 2005).

Mesmo considerando que o pensamento formal, especialmente aquele estruturado pela linguagem matemática, é fundamental para a constituição da ciência, particularmente da Física como a conhecemos hoje, podemos legitimamente nos perguntar se apenas a linguagem matemática é suficiente para estruturar o pensamento do cientista a ponto de permitir-lhe elaborar interpretações da natureza. Este questionamento vai ao encontro da primeira

pergunta que levantamos, com relação ao eventual papel de pensamentos e linguagens não formais na construção da ciência.

Consideramos que o psicólogo estadunidense Jerome Bruner pode nos auxiliar em um encaminhamento possível a estes questionamentos. De certa maneira, Bruner nos possibilita um olhar epistemológico para a linguagem. Tomar este autor como referência se torna relevante, principalmente, por sua proposta de que os seres humanos apresentam dois tipos básicos de pensamentos: *Pensamento lógico-científico* e o *Pensamento Narrativo*. Segundo o autor, utilizamos esses pensamentos como forma de organizar nossas experiências, de construir realidade. De acordo com Bruner, estes pensamentos podem apresentar-se de maneira complementar, e não é possível reduzir um ao outro.

Tendo em vista as considerações anteriores, sobre o eventual papel de pensamentos e linguagens não formais na construção da ciência e o caráter formal que identifica de maneira mais singular a linguagem da Física, aliado, ainda, ao apontamento teórico de Bruner, levantamos a seguinte questão: *Qual o papel do Pensamento Narrativo para a prática do cientista e como este tipo de pensamento pode, eventualmente, se relacionar com pensamentos formais, estruturados pela linguagem matemática?* Poderemos delinear uma resposta possível a esta questão apenas se nossa investigação for feita em contextos bem delimitados da história do conhecimento físico. Tendo isto em vista, nossa pesquisa será feita no contexto de elaboração da Teoria da Relatividade Geral (TRG), do físico alemão Albert Einstein. Portanto, nossa questão de pesquisa se circunscreve da seguinte maneira: *Qual o papel das Narrativas e da Matemática no pensamento de Einstein no contexto de construção da Teoria da Relatividade Geral?*

Entendemos que compreender como essas duas formas de linguagens/pensamentos funcionam na dinâmica interna da Física poderá nos indicar como trabalhar este conhecimento em sala de aula utilizando uma linguagem mais próxima da dos alunos, considerando que eles, de maneira geral, estão mais habituados com linguagens não formais, mas, ao mesmo tempo, sem

perder as características próprias deste conhecimento, como sua proximidade com a linguagem Matemática. Maria José de Almeida (2001), por exemplo, argumenta a favor “do trabalho paralelo e contínuo com as duas linguagens nesse ensino [de Física], procurando entender o funcionamento de cada uma, comum³ e Matemática, nesse trabalho” (ALMEIDA, 2001, p.2).

A escolha de Einstein, particularmente no contexto da TRG, não foi ao acaso, ou apenas um gosto pessoal (embora isto tenha sido considerado). Em primeiro lugar, a obra de Einstein é notadamente permeada por discussões filosóficas, o que torna o alemão um “cientista-filósofo” (PATY, 1993). Esta é uma característica interessante, visto que nossa pesquisa seguirá um viés epistemológico. Esta característica de Einstein fez com que ele próprio refletisse e escrevesse sobre sua própria produção. A escolha pela TRG se deve, em partes, pelo seu reconhecido grau de matematização, mas também, por suas criações inovadoras e revolucionárias que mudaram a visão de mundo da Física, especialmente àquelas relacionadas às concepções de espaço, tempo e gravitação. Outro motivo, não menos importante, deve-se ao fato de a obra de Einstein ter grande reconhecimento, tanto na comunidade científica como fora dela. Isto faz com que haja material de consulta em abundância, seja do próprio cientista, seja dos especialistas na sua obra.

³ A autora utiliza o termo linguagem comum como sinônimo de linguagem ordinária.

Capítulo 2

Linguagem, pensamento e visão de mundo

A linguagem é o meio que dispomos para descrever a realidade que nos cerca? A linguagem molda nossas visões de mundo acerca da natureza? Ela atua como forma de descrevermos ou interpretarmos o mundo? A linguagem está inserida em nossas atividades? Questões desta natureza nos remetem a uma abordagem filosófica sobre o funcionamento da linguagem no empreendimento humano de compreender o mundo. A linguagem tem sido, há tempos, um tema central entre os filósofos. Acreditamos que um “recuo” filosófico auxiliará na compreensão do nosso problema de pesquisa e ajudará a fundamentar a visão de linguagem que defendemos neste trabalho: uma visão que considera que a linguagem estrutura nosso pensamento, permitindo-nos construir interpretações da natureza coerentes com a realidade física.

Pretendemos, ao longo deste capítulo, discutir a linguagem de um ponto de vista filosófico. Focaremos, especialmente, na crítica de Ludwig Wittgenstein à concepção referencial da linguagem. Na sequência desta discussão mais ampla, focaremos nos assuntos mais diretamente relacionados a esta pesquisa, discutindo sobre o papel da matemática na física e, na sequência, sobre as narrativas como forma de pensamento, de acordo com a proposta de Bruner.

2.1 Concepção Referencial da Linguagem e a “Terapia” de Wittgenstein

A linguagem tem sido um tema de amplo interesse de estudo, não só na área de ensino de ciências, mais recentemente, mas na filosofia tradicionalmente. Na filosofia contemporânea, em especial, a linguagem tem sido objeto de discussões filosóficas e epistemológicas, particularmente.

A linguagem tem sido o tema por excelência da filosofia contemporânea. As escolas e sistemas mais importantes e os filósofos mais influentes, seja em lógica, teoria do conhecimento, ontologia, ética, de uma forma ou de outra acabam abordando a linguagem. Nossa *epistemê*, nossa configuração de saber, é linguística. Vivemos uma época de pensamento pós-metafísico, resultante da virada linguística (ARAÚJO, 2001, p.9).

O interesse pela linguagem na filosofia se deu com maior ênfase depois da metade do século XIX, com um “movimento” que se convencionou chamar de “virada linguística”. Araújo (2007) aponta que o pressuposto comum entre os autores da virada linguística “é que a linguagem (em seus aspectos sintáticos, formais, lógicos, estruturais, semânticos) permite operações como pensar, conhecer, deduzir” (ARAÚJO, 2007, p.2). Assim, prossegue Araújo, “a linguagem não se reduz a um simples instrumento para o pensamento representar as coisas, sua **estrutura articulada**, é independente de um sujeito ou de uma vontade pessoal ou subjetiva” (*idem*). Esses pressupostos contrariam, principalmente, o essencialismo platônico e a defesa cartesiana de que “a linguagem é apenas a expressão do pensamento, e mesmo assim uma expressão imperfeita, sem nenhum papel portanto na formação do conhecimento” (MARCONDES, 2010, pp.41-42).

Um dos problemas clássicos da filosofia da linguagem, que queremos destacar, está relacionado ao papel da referência. No final do século XIX, quando a atenção se volta para a proposição, que faria a relação entre linguagem e realidade, “a função da referência se torna central e imprescindível para a semântica, para a significação” (ARAÚJO, 2007, p. 6). Um dos autores reconhecidos por tratar deste problema foi o filósofo austríaco Ludwig Wittgenstein. Enfatizaremos, especialmente, sua crítica à concepção referencial da linguagem.

Algumas perspectivas filosóficas, no início do século XX, entendiam que o papel da linguagem era fazer referência aos objetos do mundo, havendo, assim, uma relação biunívoca entre signo e objeto. Nesta perspectiva, saber a verdade ou falsidade de uma proposição é condição indispensável para a compreensão de seu

significado: “A linguagem só pode falar de certas coisas, pois o dizível limita-se às proposições com função de verdade, portanto, ao que é verdadeiro ou falso, conforme a adequação ou não aos fatos” (ARAÚJO, 2001, p.59). Dentre os filósofos que seguiam esta concepção de linguagem estavam alguns filósofos lógicos, com destaque para Gottlob Fregue (1848 – 1925), Bertrand Russel (1872 – 1970) e o já citado Ludwig Wittgenstein (1889 – 1951).

O caso de Wittgenstein é interessante, pois em um primeiro momento ele deu importantes contribuições seguindo a concepção referencial da linguagem, com destaque para sua obra *Tractatus Logico-Philosophicus*, publicada em 1921, que se tornou uma grande referência na filosofia, em especial, exercendo grande influência sobre a filosofia da ciência, particularmente no positivismo lógico representado pelo círculo de Viena. Até hoje, muitos consideram o *Tractatus* como a principal obra filosófica de Wittgenstein. No entanto, o filósofo austríaco tornar-se-ia um dos principais críticos da concepção referencial da linguagem, portanto, um dos principais críticos de sua própria obra. A obra “*Investigações filosóficas*” é a mais representativa desta segunda fase do filósofo. Nesta segunda fase do pensamento de Wittgenstein, ele passa a uma postura pragmática, afirmando que o significado da linguagem está no *uso* que dela fazemos.

Para o primeiro Wittgenstein configura-se como linguístico “tudo aquilo que *representa* logicamente” (MORENO, 2000, p.16). *Abbilden* é um termo bastante usado no *Tractatus* para caracterizar a forma de representação pela linguagem. As proposições são o centro das investigações sobre o funcionamento da linguagem, como dissemos anteriormente. Para Wittgenstein, as proposições são, na verdade, estruturas complexas formadas de *proposições elementares* (MORENO, 2000). O que temos acesso, de acordo com Wittgenstein, são os “estados de coisas”, estruturas logicamente possíveis. O que determina o mundo são os fatos e não elementos simples (objetos). Então, “nosso acesso ao mundo se dá pelos fatos, e isso significa que só podemos *pensá-lo* e *exprimi-lo* a partir dos fatos” (MORENO, 2000, p. 21-22). Assim como as proposições são formadas por elementos básicos, as proposições elementares, os fatos também são complexos e são compostos por *fatos atômicos*. A proposição elementar é para a linguagem a

forma de representação, enquanto os fatos atômicos são a substância do mundo. Esses dois pontos de vista são complementares: “o mundo, fornecendo a noção de *substância*, e a linguagem, fornecendo a noção de *forma de representação*. Essas duas noções não são senão as duas faces de uma mesma moeda: a *forma lógica*” (MORENO, 2000, p. 23, grifo nosso). Assim, podemos perceber o quanto a concepção referencial está arraigada no pensamento filosófico do primeiro Wittgenstein, especialmente, na obra *Tractatus*. A concepção referencial pode ser notada através da relação biunívoca entre as proposições elementares e os fatos atômicos, entre linguagem e mundo. Contudo, mais tarde Wittgenstein faria uma terapia filosófica⁴ sobre a concepção referencial da linguagem e, conseqüentemente, faria uma autoterapia, a fim de dissolver as confusões causadas por concepções, segundo ele, fundadas sobre pensamentos metafísicos.

Uma das críticas do segundo Wittgenstein é direcionada às teorias platônicas. Em particular, o filósofo austríaco criticou a busca por essências, tão cara a filósofos como Platão (428 a.c – 348 a.c) e Santo Agostinho (354 – 430), filósofos citados por ele em sua obra.

Wittgenstein parte, especialmente na sua obra *Investigações Filosóficas*, de um método parecido com a maiêutica socrática⁵, para chegar a conclusões diametralmente opostas às de Platão (GOTTSCHALK, 2010, p. 68). Para problematizar a ideia da existência apriorística de essências no mundo, Wittgenstein propõe a investigação de uma suposta essência do conceito de jogo, isto é, uma tentativa de chegar a uma resposta para a seguinte questão: O que é um jogo “em si”? O que caracterizaria o jogo de cartas, de tabuleiro, de bola, etc.? Wittgenstein pretende fazer, com estas questões, a terapia do essencialismo platônico. Esta terapia tem como finalidade *mostrar* a ausência de algo comum a todas as aplicações de uma palavra. Wittgenstein quer, com sua terapia filosófica,

⁴ A terapia filosófica, no sentido de Wittgenstein, é uma espécie de método que tem como finalidade o esclarecimento de confusões de natureza conceitual. Para ele, os problemas filosóficos surgem de confusões conceituais, particularmente quando se considera teorias metafísicas para fundamentar nossa concepção de conhecimento.

⁵ É um método ou técnica que pressupõe que a verdade está latente em todo ser humano, podendo aflorar aos poucos na medida em que se responde a uma série de perguntas simples, quase ingênuas, porém perspicazes. Este método pressupõe a existência de essências no mundo. Platão, no diálogo *Mênon*, por exemplo, utiliza a maiêutica para buscar a essência de virtude.

dissolver os problemas apresentados pelo essencialismo platônico. Para isto, ele aplica a palavra jogo em situações efetivas e até inusitadas. Mostra que conseguimos dar exemplos de diferentes jogos, algumas das características que os jogos apresentam, isto é, os usos que fazemos da palavra jogo. No entanto, para o filósofo austríaco, fica claro que não somos capazes de identificar uma característica que perpassasse todos os exemplares de jogos. O que fazemos é identificar as semelhanças e diferenças entre estes diferentes tipos de jogos, a exemplo do que fazemos ao identificarmos semelhanças entre os integrantes de uma família. A partir desta forma que utilizamos para “delimitar” o que é jogo (e qualquer outro conceito) que surge a ideia de *semelhanças de família*, contrapondo a posição defendida pelos essencialistas, de que há algo de comum que caracterizaria um determinado conceito (virtude, jogo, etc). Assim, não há uma essência de jogo, mas semelhanças de família entre as diversas formas de utilizarmos o conceito de jogo.

Wittgenstein opunha-se às concepções de conhecimento baseadas, segundo ele, em proposições metafísicas. Ele criticava severamente o essencialismo platônico. Sua postura filosófica pode ser caracterizada como pragmática, no sentido de buscar compreender o funcionamento da linguagem a partir dos usos que fazemos dela em diversas situações. É para defender essa visão que ele escreveu uma famosa frase da obra *Investigações Filosóficas*: “Não pense, mas olhe!” (WITTGENSTEIN, I.F., #6.6)⁶. Ou seja, não crie teorias do conhecimento a partir de entidades metafísicas, “apenas” veja o uso que fazemos de determinados conceitos e expressões linguísticas. Neste sentido que, para Wittgenstein, o significado das palavras e dos enunciados está no uso que fazemos da linguagem.

Arley Ramos Moreno, filósofo brasileiro especialista em Wittgenstein, expõe as importantes diferenças entre a visão do primeiro e segundo Wittgenstein e conclui que:

A significação linguística torna-se [na segunda fase do pensamento de Wittgenstein], por princípio, independente dos fatos, e a referência, ainda que

⁶ I.F significa referência à obra *Investigações Filosóficas*. Esta obra é estruturada em parágrafos, portanto, #6.6 representa o número do parágrafo específico que foi citado.

virtual, isto é, por mais abstrata e formal que seja, não mais terá privilégio sobre outros mecanismos possíveis. Assim, a linguagem passa a ser considerada do ponto de vista da multiplicidade de usos que podem ser feitos das palavras e enunciados, e o mecanismo referencial será, então, relativizado e situado em seu justo lugar: corresponderá a um dos usos possíveis. (MORENO, 2000, p.60)

Os “jogos de linguagem” configuram-se como uma ideia central para compreendermos o pensamento do segundo Wittgenstein. Esta é uma concepção metafórica criada pelo filósofo para caracterizar sua nova concepção de linguagem. Moreno (2000) indica o papel e a relevância desta concepção metafórica no pensamento do segundo Wittgenstein.

Essa expressão [jogo de linguagem] procura salientar, com a palavra ‘jogo’, a importância da *praxis* da linguagem, isto é, procura colocar em evidência, a título de elemento *constitutivo*, a multiplicidade de atividades nas quais se insere a linguagem; concomitantemente, essa expressão salienta o elemento essencialmente dinâmico da linguagem – por oposição, como vemos, à fixidez da forma lógica (MORENO, 2000, p.55).

Assim, entendemos que considerar a linguagem do ponto de vista dos “jogos de linguagem” é uma maneira de considerar que a linguagem é mais do que apenas nossa forma de descrever o mundo, como na concepção referencial. A linguagem está relacionada com nossas ações. Isto implica que, de certa maneira, os jogos de linguagem que nós jogamos nos permitem formar diferentes visões de mundo. Nossa visão de mundo é tributária do que Wittgenstein chamou de *formas de vida*, que dependem das regras da linguagem que seguimos.

Podemos considerar, partindo de uma interpretação do que Wittgenstein propôs, que a comunidade de cientistas compõe uma dada *forma de vida*, que articula jogos de linguagens, com práticas relacionadas a eles, de maneira específica e que, portanto, os diferenciam de outras formas de vida. Esta interpretação pode ser usada, entre outras coisas, para justificar o caráter imbricado da observação e interpretação (HANSON, 1968). Por exemplo, um físico e seu filho observam a mesma coisa quando olham para um tubo de raio-X? De acordo com Hanson (1968) a resposta é sim e não. Sim, têm consciência visual do mesmo objeto. Não, o modo como têm essa consciência é profundamente

diverso. Isto se deve pelo fato, de acordo com a interpretação que estamos propondo, do fato não fazer parte da forma de vida dos físicos, de não compartilhar as mesmas regras, os mesmos jogos de linguagem. Hanson (1968) defende que é necessário aprender para depois observar: “quem nada aprendeu, nada pode observar – isso é parte do conteúdo semântico da palavra ‘observar” (p.134).

A principal lição que gostaríamos de tirar das contribuições de Wittgenstein para esta pesquisa se deve ao fato de a linguagem não ser um mecanismo de referência direta ao mundo. Isto é, a linguagem é constitutiva das nossas visões de mundo e não uma mera ferramenta de descrição, ainda que descrever ou usar referências sejam usos possíveis da linguagem. A consideração de que existem diferentes formas de vida, que seguem determinadas regras e que compõem diferentes visões de mundo, é particularmente interessante quando pensamos no contexto educacional, uma vez que inserir nossos alunos nas discussões acerca da ciência seria, em alguma instância, fazê-los compartilhar parte de uma forma de vida. Não se espera, contudo, que o aluno seja inserido completamente nesta forma de vida, a menos que o objetivo seja formar um cientista, que não é o caso do ensino básico, como discutimos na introdução deste trabalho.

A crítica de Wittgenstein à fixidez da forma lógica da linguagem, presente na concepção referencial, nos ajuda a justificar nossa questão de pesquisa. Levantar a hipótese de que os cientistas usam linguagens não formais em suas práticas, na sua forma de vida, parece coerente com a postura filosófica de Wittgenstein. Se partíssemos de uma concepção referencial, no entanto, a única opção seria analisar um tipo de linguagem que, em última instância, representasse a forma lógica do mundo. Ou seja, restar-nos-ia apenas as formas lógicas de linguagem, que cumpririam o papel de fazer a ligação entre as proposições da linguagem e os fatos do mundo. Assim, as dimensões interpretativas e criativas da ciência seriam desconsideradas.

A seguir discutiremos aspectos mais diretamente relacionados a esta pesquisa, a saber, sobre o papel da matemática na física e sobre as narrativas como modo de pensamento para ordenamento da experiência, como meio de interpretar a realidade.

2.2 O papel da Matemática na construção e no ensino da Física

Na seção anterior demos ênfase a uma discussão filosófica a respeito do papel da linguagem em nossas visões de mundo e em nossas práticas. Esta discussão foi pautada, particularmente, em algumas ideias do filósofo Wittgenstein. Falamos de linguagem num sentido mais amplo, defendendo que seu uso extrapola apenas a referência e que, portanto, ela é constitutiva de nossas interpretações acerca da realidade. Nas seções que se seguem, discutiremos aspectos mais próprios da nossa pesquisa, dando ênfase à matemática e às narrativas, ambas como forma de pensamento⁷.

Esta seção será dividida em duas partes. Na primeira subseção, apresentaremos um quadro sintético sobre os trabalhos em ensino de física que tomam como foco de pesquisa a relação entre física e matemática. Este quadro foi elaborado por Mannrich (2014) com base em revisões presentes nas teses de Ricardo Karam (2012) e Ana Raquel Ataíde (2012). Na subseção seguinte, teceremos uma discussão de cunho epistemológico sobre a relação entre matemática e física, que fundamentará parte desta pesquisa.

2.2.1 A relação entre matemática e física na pesquisa em ensino

Maurício Pietrocola, professor titular da Faculdade de Educação da USP, é uma das principais referências da nossa área quando se trata da temática que discutiremos nesta subseção, a relação entre matemática e física. Em particular, Pietrocola publicou um trabalho em 2002, no “caderno catarinense de ensino de física” (atual “caderno brasileiro”), que teve bastante reconhecimento na nossa área de pesquisa, influenciando as subsequentes pesquisas em ensino de física no

⁷ Pensamentos estruturados a partir das linguagens matemática e narrativa, respectivamente.

Brasil que buscavam estudar o papel da matemática na física. Trata-se do artigo “*A matemática como estruturante do pensamento físico*”. Neste trabalho, Pietrocola parte de um suposto problema didático apresentado no contexto do ensino de física, a saber, a indicação do insuficiente conhecimento matemático por parte dos estudantes como a principal causa das dificuldades no aprendizado da física. A partir disto, empenhou-se, então, em uma investigação epistemológica sobre o papel da matemática na física. Baseia-se em discussões filosóficas, de Michel Paty, Gaston Bachelard e outros. O autor parte de uma visão de linguagem que a entende como algo que vai além da comunicação direta e da descrição das coisas, ou seja, parte de uma visão que entende que a linguagem dá forma às nossas ideias e permite-nos lidar com elas, algo coerente com as ideias de Wittgenstein, apresentadas na seção anterior.

Embora considere que a matemática pode desempenhar um papel descritivo na física, Pietrocola (2002) defende que esta não é sua principal função. Para ele “[...] sua maior importância está no papel estruturante que ela pode desempenhar quando do processo de produção de objetos que irão se constituir nas interpretações do mundo físico” (PIETROCOLA, 2002, p. 100). Neste sentido, a Matemática enquanto linguagem empresta sua estruturação ao pensamento científico para compor os modelos físicos sobre o mundo, ou seja, ela compõe a visão de mundo do cientista. De acordo com o autor, a escolha da matemática enquanto estruturadora da ciência reside, entre outras coisas, nas suas características de precisão, universalidade e lógica dedutiva (idem).

Este trabalho, de cunho teórico-epistemológico, teve influência direta, por exemplo, em trabalhos que buscam discutir a temática de resolução de problemas. Karam e Pietrocola (2009), baseados na ideia de matemática como estruturante do conhecimento físico, propuseram que existem dois tipos de habilidades envolvidas nas resoluções de problemas da física relacionados à matemática, o que eles chamaram de *habilidades técnicas* e *habilidades estruturantes*. Nele, os autores defendem que mesmo com os problemas mais tradicionais é possível desenvolver habilidades estruturantes (KARAM & PIETROCOLA, 2009). Cibele Celestino Silva e Pietrocola discutiram o caráter

estruturante da matemática no contexto da teoria do eletromagnetismo, defendendo que esse papel desempenhado pela matemática deve ser discutido com os estudantes (SILVA & PIETROCOLA, 2003). Ainda sobre o papel da matemática na física, Silva discute as analogias formais e materiais presentes na história do eletromagnetismo (SILVA, 2005; SILVA, 2007).

Mais recentemente, algumas teses e dissertações têm sido defendidas com relação à temática tratada nesta seção. Ricardo Karam (2012), tomando como um dos pontos de partida a dificuldade enfrentada pelos estudantes para compreenderem equações e a utilização da matemática (como estruturante) para resolução de problemas de física, fez um estudo de caso em aulas de relatividade e eletromagnetismo. Sua análise resultou em oito categorias, destinadas a descrever e avaliar abordagens didáticas em relação à ênfase em múltiplos aspectos da imbricada inter-relação física e matemática em contextos de ensino. Ana Raquel Ataíde teve como objetivo principal entender como estudantes de nível superior, alunos de último ano da Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, percebem a função da matemática na construção dos conceitos físicos. Sua pesquisa focou, em especial, na primeira lei da Termodinâmica. João Paulo Mannrich (2014) desenvolveu atividades em que estudantes de licenciatura discutiram sobre o tema “Resolução de problemas e o papel da matemática na física e no ensino de física”, a partir de artigos da literatura. Em sua dissertação, Mannrich (2014) desenvolveu, a partir de revisões presentes nas teses de Karam e Ataíde mencionadas acima, três quadros sintéticos de trabalhos da nossa área (ensino de ciências) que tratam da relação entre matemática e física. Como a nossa pesquisa pode prescindir de uma revisão profunda a este respeito, uma vez que isto poderia representar uma pesquisa completa por si só, tomaremos estes quadros sintéticos como indicação geral do que vem sendo desenvolvido na nossa área a respeito desta temática.

Ao todo serão apresentados três quadros. O primeiro refere-se a um resumo de Mannrich (2014) das principais ideias apresentadas na revisão bibliográfica da tese de Karam (2012). Os quadros 2 e 3 referem-se a resumos das principais ideias da revisão de Ataíde (2012).

Quadro 1 – Resumo das Principais ideias dos trabalhos analisados por Karam (2012)

Autores(as)	Principais ideias
Angel et al. (2008)	- o EF [ensino de física] deve dar aos estudantes uma visão da natureza da Física como uma atividade de modelização, treinando-os para que se tornem capazes de construir e de interpretar modelos, relacionadas à habilidades de interpretar o fenômeno de maneira conceitual, gráfica, pictórica, experimental e matemática
Sherin (2001)	- investiga como estudantes em nível superior compreendem equações físicas por meio de problemas não tradicionais. - os estudantes aprendem a entender equações da física em termos de formas simbólicas, as quais estão associadas a ideias simples e fundamentais.
Bagno et al. (2008)	- propõe questões conceituais sobre fórmulas físicas, como identificar a grandeza física associada a cada um de seus termos, analisar 46 casos particulares e restrições, e escrever o significado global da fórmula usando as próprias palavras. - os resultados apontam para os erros mais comuns que os estudantes cometem
Tuminaro e Redish (2007)	- analisam e descrevem o pensamento matemático de estudantes universitários (primeiros anos) ao resolverem problemas de física por meio de uma ferramenta teórica chamada de “Jogos Epistêmicos”. Tais jogos estão associadas à diferentes conjuntos de regras e estratégias que guiam a resolução.
Bing e Redish (2009)	- por meio de um mecanismo chamado “Epistemological Framig” se busca modelar o pensamento dos estudantes e examinar as garantias/justificativas oferecidas pelos mesmos quando utilizam a matemática para resolver problemas de física. São encontradas quatro estilos de pensamento: rotina de cálculo, interpretação física, invocando autoridade e consistência matemática

Fonte: Mannrich (2014, pp. 44-45)

Os quadros 2 e 3, como já mencionamos, são referentes aos trabalhos analisados por Ataíde (2012). A separação em dois quadros seguiu a própria categorização feita pela autora: trabalhos nacionais e internacionais. Além desta

categorização, a autora fez uma distinção entre os trabalhos com base epistemológica e base psicológica. Todos os trabalhos nacionais, de acordo com Ataíde (2012), são de base epistemológica. Isto se deve, particularmente, ao fato de que os interesses por este tema de pesquisa se restringiu a um grupo bem delimitado no Brasil, que seguiram as perspectivas apontadas no artigo de Pietrocola de 2002.

Quadro 2 – Resumo das principais ideias dos trabalhos nacionais analisados por Ataíde (2012)

Autores(as)	Principais ideias
Pietrocola (2002)	<ul style="list-style-type: none"> - Linguagem matemática como estruturante do pensamento físico. - O caráter estruturante da matemática para a física precisa ser explicitado aos estudantes
Bastos e Bastos Filho(2003)	<ul style="list-style-type: none"> - apresentam diferentes linhas de pensamento sobre os fundamentos da matemática (logicista, a intuicionista, a formalista e a conjuntista) e dissertam sobre contribuições que estas podem proporcionar ao ensino de ciências em nível básico e superior.
Silva e Pietrocola (2003)	<ul style="list-style-type: none"> - analisam o uso da linguagem matemática no desenvolvimento da teoria eletromagnética e mostram que ela é integrante no processo de construção da teoria. - defendem que é fundamental discutir sobre o papel desempenhado pela linguagem matemática na física com estudantes
Karam (2007)	<ul style="list-style-type: none"> - aplicou questionário com estudantes do EM para identificar suas concepções sobre as relações entre a matemática e a física
Karam e Pietrocola (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - apresentam propostas para trabalhar assuntos de física moderna no EM de forma quantitativa, buscando romper a barreira imposta pelo formalismo matemático no ensino de tais assuntos.
Karam e Pietrocola (2009a)	<ul style="list-style-type: none"> - no contexto da resolução de problemas, criticam posicionamentos que reduzem a matemática a um simples instrumento de cálculo.

	- propõem que mesmo com os problemas mais tradicionais é possível desenvolver habilidades estruturantes no EF;
Karam e Pietrocola (2009b)	- no contexto da resolução de problemas, criticam posicionamentos que reduzem a matemática a um simples instrumento de cálculo. - propõem que mesmo com os problemas mais tradicionais é possível desenvolver habilidades estruturantes no EF;
Karam e Pietrocola (2009c)	- analisam um conjunto de aulas sobre Relatividade Restrita no Ensino Superior. - propõem categorias da fala professor sobre as relações entre a Matemática e a Física. - concluem que o caráter estrutural da matemática se faz presente em todo o discurso do professor.
Pietrocola (2010)	- enfatiza o papel da linguagem matemática como estruturadora do pensamento físico. - propõe a diferenciação entre habilidades técnicas e habilidades estruturantes para pensar o EF por meio da matemática. Defende que é de fundamental importância o desenvolvimento destas últimas habilidades no EF.

Fonte: Mannrich (2014, pp. 46-47)

Quadro 3 – Resumo das principais ideias dos trabalhos internacionais analisados por Ataíde (2012)

Autores(as)	Principais ideias
Romer (1993) (Base epistemológica)	- descreve várias situações de sala de aula, vivenciadas por ele, através das quais mostra como tenta trabalhar dando um sentido às equações para que elas tenham um significado para os estudantes. - sugere que os professores utilizem uma abordagem para a Física que permita aos estudantes ter prazer pela “leitura das equações”, ou seja, desperte a atenção para a estrutura lógica do assunto e possibilite a compreensão da lógica que envolve a Física e a Matemática
Lozano e Cárdenas (2002) (Base epistemológica)	- fazem uma discussão sobre as dificuldades das relações simbólicas e de suas interpretações, enfatizando as definições explícitas, os conceitos quantitativos e valores numéricos, e as leis e seus enunciados. - sugere que os professores façam referências explícitas aos

	aspectos semânticos e sintáticos da linguagem formal que ele usa na descrição matemática de fenômenos físicos, para os estudantes poderem melhorar sua compreensão da ciência.
Redish (2005) (base epistemológica)	<ul style="list-style-type: none"> - utilizar Matemática em Física não é a mesma coisa que fazer Matemática. - defende que a habilidade manipulativa não é o bastante para a aprendizagem na Física
MartinezTorregrosa et al (2006) (base epistemológica)	- realizam um estudo histórico-epistemológico sobre o conceito de diferencial na Física, que é pouco entendido pelos estudantes, com o intuito de melhorar os modelos curriculares e pedagógicos no que se refere ao ensino desse conteúdo.
Hudson e McIntire (1977) (base epistemológica)	- a falta de domínio das ferramentas matemáticas pode prever o fracasso no estudo da física, mas dominá-las não é garantia de sucesso.
Hestenes (1987) (Base Psicológica)	- a modelagem matemática deve ser o tema central no EF
Martinez-Luaces (2004) (Base Psicológica)	<ul style="list-style-type: none"> - faz uma análise de seminários desenvolvidos em diferentes países da América Latina sobre a modelagem matemática contrastada com a resolução de problemas. - concluem que os seminários proporcionam contribuições significativas para a prática docente.
Hudson e Liberman (1982)	<ul style="list-style-type: none"> - analisam os efeitos combinados das habilidades matemáticas e raciocínio operacional formal no desempenho de estudantes em um curso de Física Geral. - apontam que o domínio técnico de conhecimentos matemáticos é importante porém não é possível afirmar que apenas tal domínio garante o sucesso dos grupos estudados
Sherin (2001)	Ver quadro 1
Crouch e Haines (2003)	- estudantes universitários das áreas de ciências e tecnologia apresentam muitas deficiências quando submetidos a situações nas quais seja necessária uma

	conexão entre o mundo real e o modelo matemático.
Rowland e Jovanoski (2004)	- discussão centrada na definição e interpretação de conceitos matemáticos envolvidos nas EDOs, e no fato de a falta de compreensão desses conceitos, tais como quantidades e taxas de variações de quantidades presentes nas equações, se consolidar como elementos que dificultam a aprendizagem de EDOs e suas aplicações em situações-problema.
Izsák (2004)	- os estudantes têm e podem usar critérios para julgar quando uma expressão algébrica é melhor do que outra para resolver uma determinada situação problema; - a construção do conhecimento por modelagem algébrica requer do estudante uma coordenação criteriosa entre as representações algébricas e vários outros conhecimentos.
Reed (2006)	- objetivando a melhoria de um software educacional com a função de melhorar o raciocínio matemático de estudantes, analisam duas situações sobre quantidades que podem orientar a compreensão de uma situação. - as conclusões apontam para relações entre as quantidades em uma equação e as conexões das representações visuais para variáveis nas equações.
Tuminaro e Redish (2007)	Ver quadro 1
Engelbrecht et al (2007)	- apontam que a taxa de retenção a longo prazo (2 anos) de técnicas matemáticas básicas de um curso de cálculo é baixa. - o valor de entender completamente os princípios básicos e conceitos é importante para a retenção do conhecimento; a retenção é melhorada quando existe uma motivação intrínseca pela atividade. - a falta de compreensão conceitual resulta em confiança diminuída o que também influencia na retenção do conhecimento.
Angell et al. (2008)	Ver quadro 1

Fonte: Mannrich (2014, pp. 49-50)

Podemos notar, a partir destes quadros, que há uma grande produção de trabalhos interessados nesta temática na nossa área de pesquisa. Nos chama a atenção, entretanto, o fato de não haver, entre os trabalhos citados, nenhum que busque relacionar, pelo menos não como principal foco de pesquisa, a matemática com outros tipos de linguagens ou outras maneiras de organizar as ideias, de estruturar o pensamento do cientista. Neste ponto, entendemos que nosso trabalho pode contribuir para a discussão já estabelecida na literatura.

A seguir, apresentaremos ideias que fundamentam a visão epistemológica desta pesquisa no que diz respeito à relação entre física e matemática.

2.2.2 Matemática e Física: uma relação profunda

A relação da Física com a Matemática é notável e é um tópico muito discutido, tanto por filósofos como pelos próprios físicos e matemáticos, assim como tem sido foco de discussão de pesquisadores em ensino de física, como mostrado na subseção anterior. Essas discussões são, sobretudo, de cunho epistemológico e buscam entender qual o papel da matemática para a elaboração dos conceitos científicos.

A prática de olhar para os fenômenos da natureza através da matemática remonta à tradição grega. Os pitagóricos, por exemplo, acreditavam que o que é permanente, unitário, verdadeiro e, portanto, inteligível sob as aparências enganosas dos fenômenos, são suas proporções harmoniosas, expressas em números. A academia platônica, por sua vez, acreditava que a realidade das aparências enganosas dos quatro elementos fundamentais – terra, ar, fogo e água – são as figuras geométricas perfeitas: tetraedro, cubo, octaedro e icosaedro. Para Platão, a realidade última eram as ideias, e neste mundo as formas geométricas, inteligidas pelo pensamento matemático, eram essenciais. De acordo com Vargas (1996, p.251), foi somente durante o período Helenístico que homens como Arquimedes deram origem à ideia de aplicação da geometria e da aritmética como instrumento de cálculo e descrição de fenômenos. Outro filósofo importante deste período foi Erastótenes, quem, entre outras coisas, mediu a circunferência da Terra e estimou as distâncias e tamanhos do Sol e Lua, em particular, através da

geometria (semelhança de triângulos). Ao final do período helenístico, Claudio Ptolomeu “utilizou intensivamente a matemática para a compreensão do movimento dos astros” (VARGAS, 1996, p.252).

Os trabalhos que resultaram na quebra do paradigma ptolomaico, séculos após os trabalhos de Ptolomeu, também podem ser analisados sob o ponto de vista da matematização da natureza. Vargas (1996) aponta o seguinte a este respeito:

[...] o que resultou do heliocentrismo de interesse para a análise da matematização da natureza foi a abolição de qualquer diferença entre o mundo das perfeições celestes e o mundo sub-lunar da corruptibilidade habitado pelos homens. De então em diante admitiu-se, como um princípio dominante das ciências, que as leis humanas são válidas para todo o universo. **Uma equação matemática deduzida teoricamente aqui na Terra, e tendo sua verdade estabelecida por experiências levadas a efeito pelos homens, vale em qualquer parte do universo por remota que seja.** (VARGAS, 1996, p. 254, grifos nossos)

Ainda que consideremos todo este importante contexto histórico aqui sumarizado, é somente no século XVII que a matemática ganha um papel mais próximo ao que temos hoje na Física. A figura marcante desta nova relação entre a matemática e os fenômenos naturais é Galileu Galilei. De acordo com Vargas (1996, p.255), foi a obra *Discursos e demonstrações matemáticas em torno de duas novas ciências*, publicada em 1638, “quem tornou patente a nova função da matemática como análise dos fenômenos naturais”. No entanto, de acordo com o filósofo francês Michel Paty (1995), Galileu ainda segue uma tradição pitagórica, em que a matemática era “concebida como um conhecimento que permitia uma leitura direta da natureza, da qual, precisamente, era a língua” (PATY, 1995, p.234). A constituição histórica da Física, entretanto, encarregou-se de substituir esta ‘tradução matemática’ da natureza por uma mediação física propriamente dita, isto é, a matematização tornou-se “inerente aos conceitos [físicos], constitutiva desses, que serve para construí-los” (idem).

Considerando que matemática e física mantêm uma relação constitutiva, Boniolo e Budinich (2005) levantaram, inspirados em Quine, a seguinte questão:

pode haver física sem matemática? Os autores tendem a responder que é possível, ou, mais precisamente, que *foi* possível. Usam como exemplo a física Aristotélica, embora a apontem como uma filosofia natural baseada no senso comum⁸. Assim, consideram que “[...] a Física sem a Matemática é concebível, ou melhor, Física sem Matemática *era* viável, porque este tipo de Física não é mais aceitável. A simples razão é que ela não teria a precisão empírica e teórica que só a Matemática fornece”. (BONIOLO & BUNDINICH, 2005, p.77, tradução nossa). Para Aristóteles, na contramão do que foi dito acima, “a precisão de minuto da matemática não deve ser exigida em todos os casos, mas apenas no caso de coisas que não têm matéria. Daí o seu método não ser o da ciência natural” (ARISTÓTELES *apud* GINGRAS, 2001, p. 389, tradução nossa). Contudo, como aponta Pietrocola (2002, p.89), o emprego da matemática tornou-se “critério de cientificidade, na física, na medida em que a incapacidade de expressar propriedades de sistemas em linguagem matemática inviabiliza mesmo a possibilidade de admiti-las como hipóteses para o debate científico”. O físico Richard Feynman parece, em algum sentido, espantar-se com o papel da matemática no conhecimento físico. Para ele, “a coisa estranha da física é que para as leis fundamentais ainda precisamos de matemática” (FEYNMAN, 1985, p.36, tradução nossa).

Então, considerando os rumos que a física tomou em direção à matematização, podemos levantar a seguinte questão: Por que a matemática é tão efetiva na física? Para Boniolo e Budinich (2005) essa é uma falsa questão, uma vez que não podemos considerar a matemática como um elemento externo à física, de modo a poder especular sobre sua eficiência.

[...] a teoria física não é algo que a matemática pode ser adicionada externamente, de modo que possamos nos perguntar sobre a razão de sua eficácia. As teorias físicas modernas e contemporâneas são signos físico-matemáticos. Estes signos são algo que não podem ser divididos em uma parte matemática e outra parte não matemática” (BONIOLO & BUNDINICH, 2005, p. 86, tradução nossa)

⁸ Discordamos que a Física Aristotélica seja baseada em senso comum. De todo modo, como os autores não explicitaram o que queriam dizer com isto e como este não é o nosso foco aqui, não entraremos neste debate.

Este posicionamento vai ao encontro da consideração de Paty (1995), de que a matemática é constitutiva dos conceitos físicos e não uma mera ‘tradução’ dos fenômenos da natureza. Ou seja, a matemática é tomada aqui como algo que compõe a visão de mundo do físico e não como uma ferramenta referencial.

Karam (2012) destaca que, segundo Poincaré, uma das razões da “proximidade” entre física e matemática reside na necessidade que o físico tem de buscar generalizações. Neste sentido, a Matemática fornece um poderoso instrumento: as analogias. Poincaré afirma o seguinte a este respeito: “O espírito matemático, que desdenha a matéria, nos ensinou a conhecer as analogias verdadeiras e profundas, as que os olhos não veem, mas a razão identifica” (POINCARÉ *apud* KARAM, 2012, p.10-11).

Uma incursão pela história poderia mostrar algumas analogias que foram essenciais para a construção de novas teorias Físicas. Cibele Silva (2005) utiliza como exemplo de uma dessas analogias a feita por William Thomson, entre eletricidade e fluxo de calor. Segundo Silva (2005), Thomson “inicialmente dedicou-se a desenvolver analogias formais entre eletrostática e fluxo de calor, sem dedicar-se a entender fisicamente o que ocorre entre os condutores, mas sim encontrar relações entre as equações que descrevem ambos os fenômenos” (p. 21). Para Silva (2005), além das analogias formais, a matematização da Física trouxe algumas vantagens para a estruturação deste conhecimento, como a capacidade de deduzir novos enunciados (potência dedutiva), fazer constatações empíricas mais finas, além de permitir a identificação de defeitos e inconsistências e a comparação de teorias com outras rivais (SILVA, 2005, p.23).

Para Paty (1995), as teorias físicas fazem intervir o uso da matemática em diversos níveis, de modo que ela é, em diferentes casos, mais ou menos constitutiva dos conceitos físicos.

No nível mais “fraco”, [a matemática] representa apenas um simples instrumento externo, despojado de conteúdo físico: é o caso do cálculo, da escolha de variáveis ou de unidades que podem ser mudadas sem acarretar qualquer modificação da teoria física [...] Ao contrário, no nível mais “forte”, a matemática pode entrar na própria construção de um conceito físico (um

exemplo simples disso é a velocidade, definida como dx/dt ou numa abstração geral de leis físicas erigida em princípio (ver, por exemplo, a enunciação do princípio de relatividade, ou da ação mínima etc.) (PATY, 1995, pp.251-252)

De acordo com este filósofo, a força da utilização da matemática manifesta-se por seu resultado em predições. A predição precisa, no século XVIII, da volta do cometa Halley surgiu como uma confirmação espetacular do sistema newtoniano, assim como o desvio da luz, observado no eclipse solar na ilha do príncipe (África) e em Sobral (Brasil), em 1919, foi para a teoria da relatividade geral. A força de um modelo físico-matemático consiste também em sua capacidade de integrar uma descoberta experimental imprevista. A física de partículas é uma área vasta de exemplos neste sentido. Ricardo Karam (2012) coloca esta característica em termos de uma “interpretação realista das entidades matemáticas”. Um dos casos mais notáveis da história da física para exemplificar este uso da matemática é a previsão de anti-partículas por Paul Dirac (1902 – 1984) em 1928, a partir da admissão de um valor negativo para a solução de sua equação de onda relativística, cuja comprovação experimental ocorreu com a detecção do pósitron em 1932 (KARAM, 2012, p.12). Paty (1995) discute o caso do neutrino que, em um primeiro momento, era uma invenção matemática que servia como “um remédio desesperado para salvar as leis da energia e da estatística”, segundo as palavras de Pauli, mas que ganhou status de uma partícula real (como o próton ou nêutron, por exemplo) através de um processo que foi desde sua utilização no interior de teorias construídas à época, como a teoria de desintegração beta de Fermi, até, finalmente, sua detecção experimental.

A discussão sobre o papel da Matemática na Física, geralmente, é feita sob um ponto de vista histórico, tomando-se o cuidado de selecionar exemplos em contextos específicos. De certa maneira, podemos afirmar que a relação Matemática-Física na mecânica newtoniana não é exatamente a mesma presente na quântica. Karam (2012) afirma que “ao dissertar de maneira geral sobre o papel da Matemática na Física, sem definir um problema e um contexto histórico específico, corre-se o risco de se chegar a conclusões excessivamente reducionistas

ou erroneamente generalizadas (KARAM, 2012, p.12-13). Para reforçar sua defesa sobre a importância da análise histórica, Karam apoia-se sobre a seguinte colocação do filósofo Michel Paty.

Quando nos interrogamos sobre a coincidência (ou harmonia) entre uma teoria Física que fornece representações de fenômenos da natureza e os conceitos e teorias Matemáticas que servem para exprimi-la, somos por vezes tentados a adotar uma postura de generalização, sem levar em conta a especificidade de cada caso e período histórico, não fazendo referência a sistemas particulares de racionalidade Física e Matemática definidos em um determinado estado de elaboração dos objetos dessas ciências. Portanto, tudo o que podemos dizer com alguma certeza sobre a relação entre a Matemática e Física, **só tem sentido quando se analisa um determinado momento, historicamente situado, tanto no que diz respeito às formas Matemáticas disponíveis como aos problemas físicos específicos.** (PATY *apud* KARAM, 2012, p. 13, grifos do autor)

Este apontamento indica a importância dos estudos de caso⁹ neste tipo de investigação, de acordo com a perspectiva da epistemologia histórica. O próprio Paty realizou alguns estudos de caso desta natureza, em particular, ligados à Teoria da Relatividade Geral (foco da investigação desta pesquisa). Paty (2005), ao fazer um estudo de caso sobre a TRG, considera que foi a partir da elaboração desta teoria que Einstein vivenciou a grande importância do pensamento matemático não só na formulação da teoria física, mas na possibilidade de sua própria elaboração, que precisava das mais sofisticadas teorias matemáticas da época, tais como o cálculo diferencial absoluto ou tensorial e as geometrias não euclidianas. Por causa desta intensa participação do pensamento matemático na construção da TRG, Paty (2005) considera que houve, especialmente entre 1912 – 1915, um *arrastamento do pensamento físico pelas formas matemáticas*.

Embora a matemática esteja, hoje mais do que nunca, “alojada de forma definitiva no seio da física” (PIETROCOLA, 2002, p. 90), devemos considerar que o processo histórico que resultou nisto trouxe impactos sociológicos importantes para a comunidade científica, como apontou Gingras (2001). Segundo este autor, o uso da matemática, particularmente após Newton, teve o efeito de excluir

⁹ Pesquisa concentrada em momentos bem delimitados da história, que permitam o aprofundamento das questões que estão sendo estudadas.

atores de participarem legitimamente dos discursos sobre filosofia natural. De acordo com Gingras (2001, p.391), uma crítica padrão, por parte de alguns, ao avanço da matemática na física estava relacionado às suas convicções de que a ciência devia ser acessível a um amplo círculo de pessoas. O autor traz uma crítica à teoria de Newton, tecida por um francês, que mostra como alguns se sentiram excluídos e, por conseguinte, não aceitavam a nova maneira de se pensar e estruturar a filosofia natural: “Para mim, que não sou um calculador, devo admitir que me sinto revoltado contra este novo tipo de filosofia” (Massière *apud* GINGRAS, 2001, p.394, tradução nossa). Para Gingras (2001), colocar muita matemática na física não restringia apenas potenciais leitores, mas também potenciais contribuidores. Assim, a “matematização contribuiu para a formação de um campo científico relativamente autônomo, com seus mecanismos de acesso” (GINGRAS, 2001, p. 395, tradução nossa). Em outras palavras, o uso da linguagem matemática tornou-se uma prática bastante própria da forma de vida dos cientistas, diferenciando-os de outras formas de vida.

Entendemos que esta análise de Gingras (2001) nos oferece uma boa oportunidade para fazermos um paralelo com o ensino de física, através do seguinte questionamento: será que a matematização exclui nossos alunos, assim como excluiu parte daqueles interessados pela filosofia natural? Acreditamos que a matemática pode ser um entrave para o entendimento da física e, por consequência, excluir de alguma maneira o estudante de participar da forma de vida dos cientistas (ainda que, claramente, não se pretenda que o aluno seja um mini-cientista, acreditamos que se pretende que o aluno se valha da visão de mundo da ciência para sua ação como cidadão participante da sociedade atual, ou seja, que ele participe, em algum grau, da forma de vida dos cientistas). No entanto, esta potencial exclusão é de natureza diferente da mencionada por Gingras (2001), uma vez que a física já está consolidada matematicamente, diferente do contexto em que pessoas como Massière reivindicavam outros rumos para a filosofia natural (ou a continuidade da forma tradicional de se fazer filosofia, de estudar a natureza). Com isto, acreditamos que ensinar a matemática no contexto da física seja necessário para que os estudantes não sejam excluídos,

e que possam apreender uma visão coerente com a visão de mundo daqueles que participam da forma de vida dos físicos. Isto não deve significar, de forma alguma, que contemplar esta dimensão epistemológica seja suficiente para que os estudantes possam compreender a física, uma vez que este conhecimento não se reduz aos seus aspectos matemáticos formais, mesmo sendo os conceitos físicos constitutivos da linguagem matemática. Pietrocola (2002), por exemplo, critica os pontos de vista que consideram que os alunos não entendem Física simplesmente devido às suas fragilidades em conhecimentos matemáticos. Sua crítica se deve ao fato de que a partir deste ponto de vista, de acordo com o autor, haveria uma tendência em considerar a Matemática como uma mera ferramenta utilizada pela Física, como se o papel da Matemática fosse, exclusivamente, o de articular os conceitos “puramente” físicos, quando, na verdade, a relação entre Matemática e Física é mais profunda, como procuramos discutir ao longo desta subseção. A defesa do autor é que o papel mais importante desempenhado pela linguagem Matemática na Física, como já apontamos na subseção anterior, é o de *estruturante* deste conhecimento (PIETROCOLA, 2002), ou seja, que a matemática é constitutiva dos conceitos físicos (PATY, 1995). Concordando com esta perspectiva, Karam (2012) afirma que:

De fato, devido a um complexo conjunto de razões, a falta de compreensão da relação de dependência mútua entre Matemática e Física é um problema extremamente relevante para ensino de ciências (Física), apesar de não ter sido enfrentado de maneira sistemática. É bastante comum encontrarmos estudantes, e muitas vezes também professores, que consideram que a Matemática é uma mera ferramenta para a Física, sem perceber seu poderoso valor como instrumento de pensamento (KARAM, 2012, p.2).

Embora a matemática seja um poderoso instrumento que estrutura o pensamento do cientista e desempenha um papel constitutivo dos conceitos físicos, características ainda mais latentes quando se considerada a Física Moderna (Quântica e Relatividade), acreditamos que somente a Matemática não permite que o cientista construa suas interpretações acerca da natureza. Ainda que a Física seja, em grande parte, uma ciência formal, ela também é empírica, ou seja, apresenta um compromisso com o mundo real, o que não

necessariamente é verdade para a Matemática. Paty (1995) alerta para o cuidado a ser tomado com relação à supervalorização do papel da lógica matemática para a física.

Pensar que, no raciocínio intermediário de tipo matemático, cada termo, cada relação tenha necessariamente uma transcrição física, significaria colocar em princípio que as entidades matemáticas são mais reais que a própria realidade física - o que nos levaria a uma ontologia pitagórica - e considerar que a lógica tem, por si mesma, esse poder de engendrar novas propriedades dos objetos físicos. Ao contrário, como Einstein percebera com muita propriedade, **“por si só, o pensamento lógico não pode nos fornecer conhecimento sobre o mundo da experiência: tudo o que conhecemos da realidade vem da experiência e nela resulta. Proposições puramente lógicas são completamente vazias em relação à realidade”** (PATY, 1995, p. 255, grifos nossos)

Esta consideração feita por Paty nos ajuda a justificar nossa questão de pesquisa, que tem como objetivo investigar a relação da matemática com outra maneira de organizar as ideias, com outro modo de pensamento que não é estritamente formal: o pensamento narrativo.

2.3 Narrativas como modo de pensamento e seu papel no ensino de ciências

Assim como fizemos na seção anterior, faremos uma separação em duas subseções, cuja primeira será destinada a apresentar trabalhos que se interessam por narrativas no ensino de ciências. Será uma amostra bastante restrita, portanto, não tomaremos esta apresentação como uma revisão ou estado da arte, mas apenas como indício de que esta temática tem se tornado cada vez mais presente no ensino de ciências. Não aprofundaremos nos fundamentos teóricos de cada um desses trabalhos, que podem estar alinhados com diferentes tendências, até mesmo contraditórias.

Na sequência desta breve revisão, apresentaremos as principais ideias que fundamentam a concepção de narrativa presente nesta pesquisa, embasada particularmente pelos trabalhos do psicólogo estadunidense Jerome Bruner.

2.3.1 Algumas Pesquisas sobre Narrativas no Ensino de Ciências

O interesse por narrativas no ensino de ciências tem sido crescente nos últimos anos. Particularmente, “há um amplo uso da narrativa na comunicação científica como uma forma de tornar a ciência mais relevante para o público em geral” (ESPINET et. al. 2012, p.1399, tradução nossa). Um dos trabalhos de vanguarda nesta temática, narrativas no ensino de ciências, foi feito pelo grupo coordenado por Jon Ogborn (1996), cuja pesquisadora brasileira Isabel Martins foi uma das colaboradoras. Trata-se da obra “*Explaining science in the classroom*”. De maneira geral, o interesse desses pesquisadores nesta obra era compreender como os professores elaboram explicações em sala de aula. Os autores buscaram uma aproximação entre pesquisadores do ensino de ciências e pesquisadores que estudam comunicação. Eles alertam para o “perigo” do uso de modelos limitados de como a linguagem e a comunicação funcionam e apontam dois tipos de resultados de suas pesquisas, práticos e teóricos:

- Resultados práticos: maneiras de pensar sobre a explicação de muitos tópicos e ideias sobre ciência, que permitam eles serem comparados ou contrastados;
- Resultados teóricos: maneiras de vincular o trabalho altamente específico de explicação de ideias científicas com questões mais amplas de comunicação;

Um resultado interessante apontado por esta pesquisa é a indicação de que as explicações científicas em salas de aula são análogas às histórias (*stories*). Segundo os autores, a construção do significado na explicação é feita em quatro partes principais, como se segue (OGBORN et. a., 1996):

Criando diferenças: Diferença como motor fundamental da comunicação: alguma coisa conhecida por um e não conhecida pelo outro (no contexto de uma “conversação”). Um tem algo a dizer que o outro não sabe. Isto, de partida, é uma diferença entre os “interlocutores”¹⁰. Pode ser diferença de conhecimento, de informação, de interesse, status, poder (no domínio/reino do sentimento).

¹⁰ Os autores não utilizam o termo “interlocutores”.

Há diferença entre conversação e explicação. O papel dos participantes de uma conversação é mais igualitário, ao passo que em uma explicação não. Os envolvidos têm papéis distintos. Distinção entre explicador e “explicando” (*explaine*): diferença com relação ao conhecimento. Um sabe algo que o outro quer ou precisa saber; diferença com relação ao poder e responsabilidade. A relação entre ambos, claro, é complementar.

Toda explicação, geralmente, surge a partir de um pedido de informação. O “explicando” toma a iniciativa.

O conjunto de conhecimentos que os alunos “necessitam” não é determinado pelos próprios estudantes, e sim pelo sistema escolar (currículo). Assim uma diferença essencial é o que o estudante sabe e o que “deve” (*ought*) saber. É assumido que o professor pode ser uma ponte entre esta diferença e ainda há uma segunda diferença: entre o que o estudante “deve” saber e o que ele quer saber. Então o professor pode necessitar provocar, estimular, demandar ou persuadir o estudante a querer o conhecimento proposto. Esta tarefa não é deixada apenas ao professor. A escola ou sistemas de educação fornece uma variedade de meios de incentivar ou obrigar os estudantes a aceitarem o que foi decidido que eles necessitam (desde a publicação de currículos e exames a sistemas de recompensa e punição). Mas motivar o aluno a “querer o que ele precisa” continua a ser crucial.

Outra diferença a ser considerada é entre o conhecimento científico estabelecido e o conhecimento do senso comum (dia a dia).

Construindo entidades: As explicações científicas são feitas, frequentemente, através de entidades desconhecidas fazendo coisas desconhecidas, e o estudante é um “estrangeiro” em um mundo desconhecido. Assim a explicação em sala de aula não é a explicação dos fenômenos, mas a explicação dos recursos que o estudante necessita para explicar o fenômeno (ex: para explicar como o som se propaga o professor ensina o estudante a pensar sobre ondas).

Antes que uma história explicativa possa ser contada, os protagonistas têm que ser descritos com o que eles podem fazer e o que é feito com eles dentro desta história. Antes de explicar como baterias podem acender lâmpadas temos que falar sobre correntes elétricas, voltagens e resistência. Por esta razão muito do trabalho de explicação em sala parece descrição, rotulação ou definição.

A variedade de entidades científicas necessitando ser trazidas à existência para os estudantes é grande. Algumas invisíveis ou intangíveis, como micróbios ou ondas. Algumas são padrões, como a tabela periódica. Algumas são abstratas, como gráficos sinodais.

Muitas entidades científicas tem que se tornar ferramenta para o pensamento, mesmo se para começar elas são apenas coisas para pensar sobre algo. Elas têm que se tornar entidades que fazem parte da explicação, não coisas que são explicadas. Então, a construção de entidades é também a construção de futuras explicações.

Transformando conhecimento: O conhecimento científico não é estático. Transformação do conhecimento para que ele seja acessível a alunos de pós-graduação, de graduação, nível médio e público geral. Uma maneira de transformar um conhecimento é torná-lo um recurso retórico. As relações narrativas coincidem com as relações conceituais a serem compreendidas, e as tornam memoráveis e mais facilmente recuperáveis.

Uso de metáforas e analogias: fundamentais para linguagem. Todos os significados são feitos a partir de outros significados, por fim, eles são embasados em ação significativa no mundo.

Colocando significado na matéria: As teorias científicas falam sobre um mundo “por trás” das aparências, e as demonstrações tentam trazer esse mundo “subjacente” à superfície.

Nesta seção da obra “explaining science in the classroom” é dada ênfase às demonstrações como forma de levar os estudantes a verem as coisas como a teoria diz que são. Exemplos: O som pode ser visto como onda; a eletrólise como um

fluxo de partículas carregadas; o tecido como sendo feito por células. Mas isto não é o bastante. O ponto de uma demonstração é persuadir que coisas são como são mostradas, mudando de um “ver-como” (*seeing-as*) para um “ser-como” (*being-as*).

A maior parte dos Professores, acreditamos, concordariam que o ato de explicar é fundamental no processo de ensino aprendido. Concordariam, também, que as explicações não devem ser “pasteurizadas”, ou seja, que não basta apresentar palavras da ciência e a que elas se referem. O trabalho de Ogborn et al (1996) apresenta como um importante resultado um referencial para análise de episódios explicativos para as aulas de ciências, tomando a explicação científica em sala de aula para além de uma mera introdução dos alunos ao discurso científico (ROMERO, 2012, p.48).

Isabel Martins, uma das autoras da pesquisa apresentada acima, participou de pesquisas mais recentes em que a narrativa tem papel central. Em parceria com Ruth Ribeiro, publicou um trabalho em que o principal foco foi analisar, com base em diversos autores que pesquisam narrativas no ensino de ciências (e também outras áreas como sociolinguística, psicologia, antropologia, entre outras), textos narrativos apresentados em livros didáticos. Um dos resultados mais gerais desta pesquisa foi perceber que “na maioria das vezes, as narrativas não interagem com o texto principal das unidades e capítulos” (RIBEIRO & MARTINS, 2007, p.299). Essas narrativas por vezes são denominadas como “leitura complementar”, o que, segundo as autoras, “compromete o nível de importância atribuída à contribuição dessas histórias para a compreensão dos conteúdos destacados no corpo principal dos capítulos” (*idem*). Detiveram-se neste artigo em analisar uma narrativa específica, que estava presente em quatro dos oito livros que as autoras analisaram, a saber, a “história de Arquimedes e a coroa do rei Hierão”.

Mais recentemente outros trabalhos com narrativas têm sido desenvolvidos. Jonathan Osborne e Lucy Avraamidou abordam o tema de maneira diferente. Para eles a especificidade da linguagem científica, particularmente seu alto grau de formalização, se coloca como um obstáculo à

compreensão dos conceitos científicos para um público de não especialistas. Os autores sugerem que a narrativa é uma maneira interessante de aproximar a linguagem dos alunos da linguagem científica, especialmente porque as narrativas estão presentes em nosso dia-a-dia, como uma das principais formas de dar sentido e organizar os fatos do mundo. (AVRAAMIDOU & OSBORNE, 2009, p. 1686). A maneira indicada pelos autores para amenizar o *gap* entre a linguagem da ciência e o discurso do dia-a-dia é a utilização de textos narrativos. A partir de uma revisão de textos científicos, os autores classificaram-os em quatro principais formas de comunicação científica: texto expositivo, texto argumentativo, narrativo e uma mistura de textos narrativo e expositivo. O texto expositivo, segundo os autores, é o mais comum, mas eles consideram que a narrativa é a maneira mais propícia para se comunicar o conhecimento científico, visto que no discurso do dia-dia a forma mais comum de texto científico é a narrativa e não os textos expositivos. Com isto, o uso das narrativas poderia facilitar o processo de ensino-aprendizagem de ciências, considerando que os estudantes estariam mais habituados com as narrativas, por terem contato com elas em outros contextos. Os autores justificam a relevância das narrativas apontando que “histórias são usadas todos os dias como forma de dar sentido e comunicar eventos no mundo. Filmes, livros, televisões, e conversas do dia-dia são repletas de histórias” (AVRAAMIDOU & OSBORNE, 2009, p. 1686, tradução nossa).

Avraamidou e Osborne (2009) defendem que as narrativas devem ser usadas em sala de aula. Segundo os autores, as narrativas são formas de o Professor apresentar o conteúdo de maneira mais compreensível ao aluno, comunicando ideias, tornando-as coerentes, memoráveis e significativas. As narrativas tornariam, segundo eles, a ciência menos “estranha” aos alunos. Elas seriam, também, uma forma dos alunos comunicarem seus próprios conhecimentos científicos. Assim como o trabalho de Ogborn et al (1996), embora em uma perspectiva bastante diferente, Avraamidou e Osborne indicam a importância das narrativas no processo de ensino e aprendizado de ciências. Ou seja, o foco é o conhecimento científico escolar. Contudo, os autores apontam que

seria importante que futuras pesquisas focassem no uso das narrativas na ciência: “[...] recomendamos que futuras pesquisas sejam direcionadas à área do uso de narrativas na ciência, identificando a existência de narrativas ficcionais que poderiam ser utilizadas na ciência e examinando seus efeitos sobre o ensino” (AVRAAMIDOU & OSBORNE, 2009, p. 1703). Este apontamento coincide, pelo menos em partes, com a perspectiva que estamos adotando nesta pesquisa, cujo objetivo é investigar o papel das narrativas de um ponto de vista epistemológico, isto é, como ela pode atuar na construção de novas ideias na ciência.

Stephen Klassen também defende o uso de narrativas no ensino de ciências. Em particular, Klassen defende e tenta desenvolver fundamentos para o uso de narrativas históricas (KLASSEN et. a. 2007). Klassen foca seus trabalhos nas narrativas que tem os próprios cientistas como protagonistas, diferente dos trabalhos de Ogborn e Martins que consideram os protagonistas como entidades da ciência que estão sendo caracterizadas dentro de uma história. Klassen (2007) defende que narrativas baseadas na história da ciência podem ser efetivamente utilizadas em sala de aula. O autor ilustra uma possibilidade desta abordagem através de uma narrativa sobre o papel de Lord Kelvin no lançamento dos primeiros cabos de comunicação trans-atlânticos durante o período compreendido entre 1857 e 1866. Este tipo de abordagem faz com que seu trabalho chegue a ser quase biográfico (GURGEL, 2010, p. 184).

Ivã Gurgel, em sua tese de doutoramento, *Elementos de uma poética da ciência* (2010), desenvolveu atividades em que os estudantes tiveram que criar suas próprias narrativas. Esta intervenção educacional mais direta foi tributária de uma pesquisa de cunho mais teórico, cujo interesse principal era investigar como os cientistas criavam novas ideias na ciência. Gurgel (2010) mostrou, com base na análise de textos originais de Galileu, Oersted e Ampère, que em momentos de novidade na ciência os cientistas criam, pelo menos nos contextos estudados, textos com características de narrativas. Gurgel (2010, p.178) defende que um novo conceito surge quando se constrói situações em que este se apresenta como elemento central da narrativa. Ou seja, as personagens dessas

narrativas são as próprias entidades científicas e o desenvolvimento da história se dá de forma que essas personagens possam ser caracterizadas, significadas.

O estudo acima dos originais que relatavam descobertas inovadoras permitiu verificar que os mesmos rompem com uma forma lógica de argumentação expositiva e se aproximam de uma composição que tem características de uma narrativa. Assim, buscamos mostrar que o novo somente aparece quando se constrói situações em que ele se torna o elemento central da narrativa. Isso implica ressaltar que não apenas a personagem precisa ser criada, mas, sobretudo, as condições de sua “entrada em cena”. (GURGEL, 2010, p. 178)

Procuramos mostrar, a partir da breve apresentação de alguns trabalhos, que as narrativas têm ganhado espaço na pesquisa em ensino de ciências, e que estes trabalhos têm sido conduzidos de maneiras diversas, contribuindo para o desenvolvimento desta temática de interesse da pesquisa em ensino de ciências. Embora os trabalhos discutidos apresentem alguma dimensão epistemológica, como o de Ogborn et al (1996) que procura entender como as entidades científicas são conceituadas nas explicações dos professores, notamos que estes trabalhos não têm como foco principal a discussão epistemológica. Em certa medida, o foco principal tem sido o papel das narrativas como um instrumento didático, seja como retórica nas explicações científicas, como suporte para inserir aspectos da história da ciência etc. Dentre os trabalhos que apresentamos, Gurgel (2010) é quem se interessa pela discussão do papel epistemológico das narrativas nas teorias científicas. Este será o enfoque dado a este trabalho. Pretendemos investigar como as narrativas eventualmente se apresentam na construção de novas ideias na ciência. Além disso, nos interessa saber como elas se relacionam com outras formas de linguagem/pensamento, como o matemático, de acordo com o que estamos propondo.

Na subseção a seguir apresentaremos a principal referência teórica sobre narrativas que fundamentará nossa pesquisa, particularmente as ideias propostas pelo psicólogo estadunidense Jerome Bruner. As narrativas serão tomadas nesta pesquisa, portanto, como um modo de pensamento.

2.3.2 Bruner e o Pensamento Narrativo

Um breve histórico: vida e obra

Jerome Bruner nasceu em 1915 na cidade de Nova Iorque, EUA. Aos 22 anos de idade, em 1937, graduou-se em psicologia, pela Duke University (Carolina do Norte). Poucos anos depois, em 1941, tornou-se doutor pela Harvard University¹¹. Durante a segunda guerra mundial, Bruner atuou como psicólogo social em pesquisas de opinião pública, propaganda e atitudes sociais (GARDNER, 2006, p.118). Após este período, em 1945, Bruner tornou-se Professor em Harvard, onde fundou, junto com Geoge Miller, o *Center for Cognitive Studies*¹² (LEME, 2009). Permaneceu em Harvard até 1970, quando aceitou um convite para trabalhar em Oxford, na Inglaterra. Voltou aos EUA em 1980, para Harvard. Em 1991, tornou-se Professor da New York University School of Law¹³, onde permanece até o presente momento¹⁴.

Bruner é considerado como um dos precursores e importantes autores da psicologia cognitiva. Como salienta a psicóloga Mônica Correia (2003, p.506), falar da trajetória de Bruner “[...] *significa falar um pouco da própria trajetória da Psicologia, especialmente da Psicologia Cognitiva*”. Os temas desenvolvidos pelo psicólogo estadunidense expressam, de maneira geral, sua busca por compreender a atividade mental do ser humano. Estudar a “mente” na década de 1950 não era uma escolha óbvia, visto que a psicologia havia tomado um rumo, até então, bastante positivista. Acreditava-se que a psicologia deveria circunscrever seu objeto de estudo de maneira que fosse diretamente observável ou distante de qualquer questão que envolvesse subjetividade. Foi o auge do

¹¹ Atualmente é doutor honorário em várias Universidades, entre elas: Yale, Columbia, Sorbonne, Berlim, Roma, etc.

¹² Centro de Estudos Cognitivos

¹³ Uma das obras que exploraremos nesta pesquisa tem forte relação com esta fase da vida acadêmica de Bruner. Trata-se da obra *Fabricando histórias: direito, literatura, vida*, cuja narrativa desempenha papel central.

¹⁴ Apesar da idade avançada, Bruner permaneceu ativo até pouco tempo. Em 2010, por exemplo, abriu um Congresso Internacional de Psicologia, na Universidade Nacional do Rosário, Argentina. Nesta oportunidade Bruner foi homenageado com um título de *doctor honoris causa*. Para mais informações sobre este título oferecido à Bruner acessar: <http://www.unr.edu.ar/noticia/2982/doctor-honoris-causa-para-jerome-bruner>

behaviorismo. Uma vez que a psicologia buscava a objetividade, o estudo da mente se configurava como um tabu, que a revolução cognitiva buscou superar. Assim, “o primeiro movimento revolucionário na Psicologia Cognitiva gritava contra essa ‘objetividade’ e distanciamento do seu verdadeiro objeto de estudo, reivindicando um foco para as atividades simbólicas dos seres humanos” (CORREIA, 2003, p. 507). Um dos estudos clássicos de Bruner, ainda na década de 1940, buscava demonstrar a influência do campo subjetivo em experimentos realizados com crianças de níveis socioeconômicos diferentes. Um dos resultados apontados foi que as crianças de menor poder aquisitivo superestimavam, em relação a outras crianças, o tamanho de figuras apresentadas como moedas.

Mesmo tendo participado da Revolução Cognitiva, Bruner passou a criticar os rumos que a pesquisa em Psicologia Cognitiva tomaram, em particular a Psicologia do Desenvolvimento (CORREIA, 2003). Uma das críticas centrais foca no abandono de dimensões importantes, como a intervenção da cultura e da afetividade no funcionamento psicológico (LEME, 2009, p.14).

Enquanto esteve na Inglaterra, na década de 1970, Bruner interessou-se mais fortemente em pesquisas sobre o desenvolvimento infantil, especialmente sobre linguagem. De acordo com Leme (2009), Bruner teria estudado intensamente a obra de Vigotski neste momento de sua trajetória. Inclusive, foi um dos grandes divulgadores da obra do bielorrusso nos EUA, em especial prefaciando o livro *Pensamento e Linguagem*, a convite de Luria, de quem se tornou grande amigo (LEME, 2009, p.14). Ao retornar aos EUA mostrou grande interesse por questões sociais e culturais, “[...] rejeitando o excesso de informática na perspectiva cognitiva que tinha ajudado a fundar, dirigiu sua atenção à narrativa e interpretação humanas [...] Ajudou a deslanchar uma terceira revolução na psicologia – uma revolução centrada na prática da psicologia cultural” (GARDNER, 2006, p.119).

Bruner teve participação ativa na área da educação, em especial no ensino de ciências. Em 1959 presidiu, a convite da Academia Nacional de Ciências dos EUA, um encontro de pesquisadores e educadores, cujo objetivo era formular as bases para um novo currículo de ciências. Este período histórico, como é sabido,

ficou marcado pela disputa política entre EUA e URSS, representada, em particular, pela corrida espacial. O conhecimento científico, portanto, era considerado essencial e já havia demonstrado seu papel como instrumento de poder, haja vista o desfecho da segunda guerra mundial. Com isso, o aumento pelo interesse da sociedade americana em formar seus jovens com competências em ciência e tecnologia pode ser considerado conjectural e, sobretudo, estratégico.

Foram desenvolvidos grandes projetos para o ensino de ciências neste contexto histórico. No caso da Física, em particular, foi desenvolvido o famoso PSSC¹⁵. Este projeto contou com centenas de Professores de Física e alguns educadores, liderados por uma equipe de físicos do MIT (sigla em inglês de “Instituto de Tecnologia de Massachusetts”), coordenado pelo Professor Jerrold Zacharias. Este projeto foi diretamente influenciado pelas ideias de Bruner, materializadas em um dos textos básicos da educação em ciências no século XX, “O Processo da Educação”, publicado em 1960 (GASPAR, 2004, p. 74). Dentre essas ideias, destaca-se sua crítica às metodologias expositivas, defendendo que a aprendizagem das Ciências se faz melhor através do envolvimento dos alunos no processo de descoberta e no uso das metodologias próprias de cada ciência.

Não há nada mais central para uma disciplina do que sua maneira de pensar. Não há nada mais importante no ensino desta disciplina do que prover às crianças a oportunidade inicial de aprenderem tal maneira de pensar – as formas de conexão, as atitudes, esperanças, piadas, e frustrações que vão com esta maneira de pensar. Em uma palavra, a melhor introdução a um assunto é o assunto em si mesmo. Antes de qualquer coisa, pensamos, deve ser dada a chance ao jovem aprendiz de resolver problemas, de conjecturar, de discutir como esses problemas são tratados no coração da disciplina. (BRUNER, 1965, p. 1013, tradução nossa).

Concordamos que o ensino de ciências deve levar em conta as maneiras próprias do pensamento científico. Aliás, este é um pressuposto básico e muito caro a esta pesquisa. No entanto, são necessárias algumas ressalvas. Em primeiro lugar, a importância deste pensamento não deve ser autocontida. Isto é, o pensamento científico pelo pensamento científico. Acreditamos que sua

¹⁵ Physical Science Study Committee

principal importância se configura na possibilidade deste pensamento ser articulado como uma maneira crítica de olhar para o mundo. Esta ressalva impede, acreditamos, de encarar o estudante de ciências como um “minicientista”, como parece ter sido o caso no PSSC. Àquela época poderia haver defesa plausível para tal postura, mas em nosso contexto defendê-la seria um retrocesso para o ensino de ciências. Em segundo lugar, mas não menos importante, devemos ter cuidado com a forma como encaramos o que é o pensamento científico, como ele se configura. Neste sentido, é extremamente importante fundamentar bem uma visão de ciência, visto que isto terá desdobramentos diretos em seu ensino. A epistemologia da ciência, portanto, tem um papel essencial para o ensino de ciências.

O PSSC, particularmente, estava fundamentado em uma visão excessivamente empirista. Embora este projeto estivesse fundamentado nas ideias de Bruner, vale salientar que as intuições e crenças pedagógicas de Zacharias, seu coordenador, também desempenharam papel de destaque. Como afirma Raimi (2004), “Zacharias não acreditava em um ensino de ciências fundado em abstrações e queria que tudo no seu projeto PSSC estivesse firmemente baseado na experimentação. Na avaliação de Zacharias, manifestações de verdade tangíveis, visíveis, tinham de preceder fórmulas e gráficos, e não há nenhuma sugestão nesse sentido nas ideias de Bruner” (grifo nosso). Gaspar (2004) defende que a postura adotada no PSSC, que pode ser considerada um erro epistemológico - no sentido de acreditar que o conhecimento científico é fruto exclusivamente da experimentação – foi uma das grandes responsáveis pelo seu fracasso. Defende, ainda, que esta concepção não era compartilhada por Bruner, pois, de acordo com o psicólogo estadunidense: “Um bom intuitivo pode ter nascido com algo especial, mas a sua intuição funciona melhor quando ele tem um sólido conhecimento do conteúdo, uma familiaridade que dá substância à intuição” (BRUNER, 1960, p.56 *apud* GASPAR, 2004, p.74).

Ainda no campo da educação, uma das principais propostas de Bruner foi o currículo em espiral. Um dos pressupostos do currículo em espiral é o seguinte: “é possível ensinar de modo intelectualmente honesto qualquer conteúdo a uma

criança”. Ou seja, não é a natureza do conteúdo que impediria sua aprendizagem, mas o nível de profundidade. Assim, a ideia é que um determinado conteúdo seja trabalhado e retomado diversas vezes no processo de escolarização, aprofundando sua formalização a cada retomada. De acordo com Leme (2009, p.16), a tese subjacente à ideia de currículo em espiral é que “a atividade intelectual, seja do cientista, seja da criança em escolarização, envolve os mesmos processos, a busca por compreender cuja diferença é de grau, não de natureza”.

Narrativas como foco de pesquisa

Em meados da década de 1980, Bruner decide organizar e publicar uma coleção de ensaios. Esta iniciativa resultou em uma de suas importantes obras: “Realidade Mental, Mundos Possíveis”, publicada originalmente em 1986. Um dos ensaios contidos neste livro interessa-nos fortemente nesta pesquisa. Trata-se do capítulo “Dois modos de pensamentos” que, segundo o autor, começou a ser preparado à convite da *American Psychological Association* (BRUNER, 1997/1986, p.IX). A ideia central deste ensaio é a proposição de Bruner de que existem dois modos básicos de pensamentos, os quais ele chamou de *pensamento lógico científico*, também chamado de *paradigmático*, e o *pensamento narrativo*. Para ele, esses são dois modos de funcionamento cognitivo, que fornecem diferentes modos de ordenamento da experiência, de construção da realidade (BRUNER, 1997/1986, p. 12). Enfatiza, ainda, que estes modos de pensamentos podem ser complementares, no entanto irredutíveis um ao outro.

Uma das principais distinções que Bruner faz entre o *pensamento lógico-científico* e o *pensamento narrativo* trata-se da relação que eles têm com a verdade. Enquanto o primeiro busca, de acordo com o autor, por verdades universais estabelecendo provas formais e empíricas, o segundo pretende-se, apenas, verossímil.

Bruner propõe que a construção de narrativas pode fazer parte do desenvolvimento da ciência. Entretanto faz isto, na nossa leitura, de maneira um

pouco tímida, ao menos em um primeiro momento¹⁶. Isto ocorre, acreditamos, pela influência epistemológica de Popper em seu pensamento. O psicólogo norte americano defende que muitas hipóteses científicas têm início como pequenas histórias ou metáforas, mas elas atingem sua maturidade científica através de um processo de conversão em verificabilidade, formal ou empírica (BRUNER, 1997/1986, p.13). A seguir selecionamos um trecho em que Bruner faz relações entre as narrativas e o desenvolvimento da ciência, em particular apontando para o suposto comprometimento da ciência com a verdade e a verificabilidade.

A ciência – particularmente a física teórica – também procede construindo mundos de um modo comparável, ‘inventando’ os fatos (ou mundo) contra os quais a teoria deve ser testada. Mas a diferença flagrante é que, de tempos em tempos, existem momentos de testes quando, por exemplo, pode-se mostrar que a luz é curva ou que os neutrinos deixam marcas em uma câmara de neblina. Pode realmente ser verdade, como Quine exortou, que a física seja 99% de especulação e 1% de observação. Mas a criação do mundo envolvido em suas especulações é de uma ordem diferente da que a criação de histórias faz. **A física deve acabar predizendo algo que é comprovadamente certo**, não obstante o quanto ela possa especular. As histórias não têm tal necessidade de comprovabilidade (BRUNER, 1997/1986, p.15, negrito nosso)

A partir deste trecho é possível notar que o distanciamento que Bruner faz entre as narrativas e a ciência está pautado, sobretudo, em uma visão contestável, do ponto de vista epistemológico, sobre o conhecimento científico. Para ele o falseacionismo de Popper é o principal critério para determinar o que é conhecimento científico. Com isto, afirma que “*se aplicarmos o critério de Popper de falsificabilidade a uma história como teste de seu valor, seremos culpados de avaliação descontextualizada*” (BRUNER, 1997/1986, p.16). De fato, a acusação de avaliação descontextualizada seria pertinente. No entanto, porque o critério de Popper seria o melhor para “demarcar” o que é científico? No nosso entender, o principal equívoco de Bruner é entender, ou dar a entender, que o conhecimento científico é capaz de predizer algo “comprovadamente certo”. Algo que nem

¹⁶ Com a expressão “em um primeiro momento” estamos querendo dizer: sua visão de narrativa na obra “Realidade Mental, Mundos Possíveis”. Em nossa leitura, o autor retoma a questão da relação das Narrativas com a ciência de uma maneira um pouco diferente na obra “A cultura da Educação”, publicada dez anos depois.

Popper, acreditamos, defenderia. Tirada essa “ilusão” com resquícios positivistas, as narrativas se aproximam muito mais do que é o desenvolvimento do conhecimento científico. Não queremos com isto defender que o desenvolvimento das ideias científicas são frutos, exclusivamente, da construção de narrativas, mas que estas podem desempenhar um papel importante neste processo.

Acreditamos que a posição tomada por Bruner com relação ao conhecimento científico, da qual nos declaramos contrários, deve-se ao fato de que a literatura do século XX lidou mais com o contexto de justificação do que o da descoberta, usando os famosos termos cunhados por Hans Reichenbach. Ou seja, os processos criativos da ciência foram pouco explorados, mesmo considerando epistemólogos como Thomas Kuhn e Karl Popper, entre outros (GURGEL, 2010, p. 85). No caso de Popper, em particular, existe uma história interessante. Uma de suas obras mais influentes, *Logik der Forschung*, cuja tradução para o português seria algo próximo de *A lógica da pesquisa científica*, foi traduzida para o inglês como *The Logic of Scientific Discovery*, que em português seria: *A lógica da descoberta científica*. Como aponta Gurgel (2010, p.85), “o erro de tradução se torna relevante quando notamos que a obra não se dedica aos processos de descoberta ou invenção na ciência”.

Ao longo de sua trajetória Bruner parece ter superado, ao menos em partes, sua visão de ciência pautada, principalmente, em Popper. No livro “A cultura da Educação”, publicado dez anos após sua primeira obra que tratava das narrativas, o autor afirma o seguinte:

[...] é possível falsificar uma grande quantidade de hipóteses, os historiadores da ciência deixam claro, sem se derrubar a teoria da qual podem ter derivado, o que sugeriu a muitos nos últimos anos que as grandes teorias da ciência talvez sejam mais parecidas com as histórias do que supúnhamos (BRUNER, 2001/1996, p.120)

Bruner passa a entender que “[...] normalmente transformamos nossos esforços de compreensão científica na forma de narrativas ou, digamos, de ‘heurística narrativa’” (BRUNER, 2001/1996, p.122). Com o termo “heurística narrativa”, o psicólogo estadunidense quer destacar, de acordo com nossa leitura,

uma característica essencial das narrativas: sua capacidade em lidar com situações problemáticas. A narrativa é, de acordo com o autor, um meio de encaminhar soluções a problemas, mas, principalmente, para encontrá-los. Neste sentido, Bruner aponta que: “a grande narrativa é um convite para descobrir problemas, não uma aula para resolvê-los. Ela diz respeito aos dilemas, às estradas por onde se caminha – mais aos nossos passos do que ao lugar onde se chega” (BRUNER, 2014/2002, p.30). Este processo passa por colocar em questão nossos conhecimentos tidos como certos, ou seja, a narrativa desafia nossa concepção do canônico, em uma espécie de dialética entre aquilo que era esperado e aquilo que veio a ocorrer (BRUNER, 2014/2002, pp.24-25). De acordo com o autor, “as histórias giram em torno de normas violadas. Isto já está claro e isto coloca os “problemas” no centro das realidades narrativas. As histórias que valem a pena ser contadas e interpretadas normalmente surgem a partir de problemas” (BRUNER, 2001/1996, p. 136). O fato dos problemas serem uma espécie de motor da narrativa faz com que ela seja, a nosso ver, uma boa candidata a se apresentar no contexto de construção da ciência. O epistemólogo francês Gaston Bachelard é conhecido por defender que o conhecimento científico se origina da busca por soluções de problemas consistentemente formulados. De acordo com Bachelard, “para o espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma pergunta [...] Nada é evidente. Tudo é construído” (BACHELARD, 1996/1938, p. 18).

Interpretação Narrativa da Realidade

As características que apresentamos sobre as narrativas, em especial o papel destacado dos problemas e sua violação da “normalidade”, questionamento do canônico, indica que as narrativas são mais do que um meio de comunicação. Elas são uma forma de lidar com a realidade externa. A narrativa é uma maneira, uma das principais de acordo com Bruner, que temos para interpretar a realidade. A própria etimologia da palavra “narrar” nos indica que a narrativa pode ir além de contar algo já sabido. Esta palavra deriva tanto de *narrare*, que teria o sentido mais restritivo de contar sobre algo, quanto de *gnarus*, que significa “conhecer de um modo particular”. Ou seja, a construção de narrativas pode ser entendida como uma maneira particular de conhecermos a realidade.

Vale a ressalva que estamos falando de uma realidade construída e não um acesso direto à realidade primeira, como um realista ingênuo poderia sonhar. Nosso acesso ao mundo é feito por mediações, através de construções simbólicas. Para Bruner, a narrativa é um desses meios de acesso. Ele defende que a narrativa é uma forma de organização do mundo exterior.

Fabricar histórias é o meio para nos conciliarmos com as surpresas e estranhezas da condição humana, para nos conciliarmos com a nossa percepção imperfeita desta condição. Histórias tornam o inesperado menos surpreendente, menos sinistro: elas domesticam a imprevisibilidade dando-lhe um verniz de banalidade (BRUNER, 2014/2002, p. 100)

Bruner coloca a narrativa como a *moeda comum* entre o nosso *self* e o mundo social (CORREIA, 2003, p.509), entre o individual e o cultural (GURGEL,2010, p.190). Assim, “explorar a natureza da narrativa, desde que sejamos sensíveis ao contexto em que foi revelada, seria explorar um modo de raciocínio” (CORREIA, 2003, p.509). Este modo de raciocínio, que representa o individual e o cultural, permite que o novo surja, a partir da reconstrução do estabelecido, em um processo dialético entre imaginação e memória.

Por meio da Narrativa nós construímos, reconstruímos, e de alguma forma reinventamos o ontem e o amanhã. Memória e imaginação amalgamam-se nesse processo. Mesmo quando criamos os mundo possíveis da ficção, não desertamos do familiar, mas o subjuntivizamos naquilo que poderia ter sido ou no que poderia ser. Por mais que a mente humana tenha exercitado sua memória e refinado seus sistemas de registro, ela nunca consegue capturar o passado de maneira completa e fiel. Por outro lado, ela jamais consegue escapar ao passado. Memória e imaginação são fornecedoras e consumidoras uma da outra. (BRUNER, 2014/2002,p.103)

Assim, podemos caracterizar a elaboração das narrativas como um processo de criação, com base na imaginação, mas que não é alheio à própria realidade e às formas culturais que são estabelecidas (GURGEL, 2010, p.190).

Ao falar da interpretação narrativa da realidade, Bruner elabora uma questão fundamental: “O que, de fato, se ganha e o que se perde quando os seres humanos extraem sentido do mundo contando histórias sobre o mesmo,

utilizando o modo narrativo para interpretar a realidade?” (BRUNER, 2001/1996, p.128). Para responder a tal questão o autor apresenta o que ele chamou de universais que permitem à interpretação narrativa dar formas às realidades que criam. Para ele esses universais são essenciais à vida em uma cultura. Ao todo, são nove elementos universais. Importante apontar que ao esboçar esses nove elementos, Bruner se deparou com o caráter inextricável da relação entre o pensamento e a linguagem.

Ao esboçar nove maneiras pelas quais a interpretação narrativa dá forma às realidades que criam, pensei ser impossível distinguir de maneira bem definida o que é um modo narrativo de *pensamento* e o que é um “texto” ou discurso narrativo. Cada um deles dá forma ao outro, do mesmo modo que o pensamento torna-se inextricável da linguagem que o expressa e que acaba moldando-o (BRUNER, 2001/1996, p. 129).

A seguir apresentamos uma síntese dos nove elementos universais propostos por Bruner:

1. Uma estrutura de tempo consignada

O tempo não é definido por um relógio, mas pelo desenrolar de eventos cruciais – pelo menos em começo, meio e fim. Bruner afirma que “o que está por trás de nossa compreensão do que é narrativa é um ‘modelo mental’ de sua temporalidade – o tempo que é limitado não simplesmente por relógios, mas pelas ações humanamente relevantes que ocorrem dentro de seus limites” (BRUNER, 2001/1996, p.129)

2. Particularidade genérica

As narrativas tratam de detalhes. As histórias são interpretadas como se se enquadrassem em gêneros e essas interpretações são influenciadas por contextos culturais e históricos. Mas o que são os gêneros? “Por um lado, um gênero ‘existe’ em um texto – em seu enredo e em sua forma de contar; por outro, ele ‘existe’ como uma forma de extrair sentido de um texto – como um tipo de ‘representação do mundo’” (BRUNER, 2001/1996, p.130). Comédia, tragédia, romance, ironia, autobiografia são exemplos de gêneros. Para concluir, Bruner afirma que os

gêneros “são formas culturalmente especializadas de vislumbrar a condição humana” (idem, p.131).

3. As ações têm motivos

O que acontece na narrativa nunca é por acaso, nem estritamente determinado por causa e efeito; os acontecimentos são determinados por crenças, desejos, teorias, valores e outros “estados intencionais”; “A busca na narrativa é por estados intencionais que se encontram ‘por trás’ das ações: a narrativa busca motivos, não causas. Os motivos podem ser julgados, avaliados no esquema normativo das coisas” (ibidem, p.132)

4. Composição hermenêutica

Nenhuma história possui uma única interpretação exclusiva. “O objetivo da análise hermenêutica é dar uma explicação convincente e não contraditória do que significa uma história” (ibidem, p.132). Bruner conclui dizendo que “todo narrador possui um ponto de vista, e nós temos um direito inalienável de questioná-lo” (ibidem, p.133).

5. Canonicidade implícita

De acordo com Bruner, para que valha a pena uma narrativa ser contada, ela deve ir contra a expectativa, deve romper um roteiro canônico ou desviar-se do “legitimado”.

A realidade narrativa nos liga ao que é esperado, ao que é legítimo, ao que é costumeiro. Mas há um aspecto curioso nesta ligação, pois a ligação canônica de realidades narrativamente construídas arrisca-se a gerar tédio. Então, por meio da linguagem e da invenção linguística, a narrativa busca cativar seu público ‘fazendo com que o corriqueiro pareça estranho novamente’. E, então, embora o criador das realidades narrativas nos ligue às convenções aceitas, ele obtém uma força cultural extraordinária ao nos fazer considerar novamente o que antes considerávamos como óbvio (ibidem, p.134)

6. Ambiguidade de referência

O tema do qual “trata” uma narrativa está sempre aberto ao questionamento. Para Bruner a narrativa cria ou constitui sua referência, a realidade para qual aponta (ibdem, p.134)

7. A centralidade do problema

Como já apontamos anteriormente, os problemas são centrais nas realidades narrativas. As narrativas que valem ser contadas normalmente surgem, de acordo com Bruner, a partir de problemas.

8. Negociabilidade inerente

Para Bruner há uma negociação entre diferentes histórias concorrentes: “você conta sua versão, eu conto a minha, e raramente precisamos brigar para acertarmos a diferença (ibdem, p.137). Esta característica, de acordo com o autor, é o que faz com que a narrativa seja tão viável na negociação cultural.

9. A extensibilidade histórica da narrativa

“Pontos decisivos de mudança”, acontecimentos-chaves no tempo quando o “novo” substitui o “antigo” é o que torna a expansibilidade da história possível; “os ‘pontos decisivos de mudança’ constituem os ingredientes cruciais neste traço da realidade narrativa” (ibdem, p.138).

Após apresentar estes nove elementos universais relacionados à interpretação narrativa da realidade, Bruner afirma que é surpreendentemente difícil examiná-la. A este respeito diz o seguinte:

As realidades narrativizadas, eu suspeito, são demasiadamente onipresentes, sua construção é demasiadamente habitual ou automática para ser acessível à fácil inspeção. Vivemos em um mar de histórias, e como os peixes que (de acordo com provérbio) são os últimos a enxergar a água, temos nossas próprias dificuldades em compreender o que significa nadar em histórias. Não que não tenhamos competência em criar nossos relatos narrativos da realidade – longe disso -, somos, isso sim, demasiadamente versados. Nosso problema, ao contrário, é atingir uma consciência do que fazemos facilmente de forma tão

automática, o antigo problema da *prise de conscience*. (BRUNER, 2001/1996, p.140)

Este apontamento feito por Bruner indica que, talvez, as histórias estão mais presentes na atividade do cientista do que podemos imaginar em um primeiro momento, sem fazer uma análise focada em estudar esta hipótese. Assim, nossa questão de pesquisa, complementando a analogia do Bruner, tomará como ponto de vista o “pescador” olhando para o peixe nadando, em hipótese, em um mar de histórias.

Nos capítulos que se seguem analisaremos textos de Einstein: artigos acadêmicos; correspondências trocadas com cientistas; textos de divulgação escritos por Einstein, que têm valor como reflexões epistemológicas sobre sua própria produção.

Antes da análise propriamente dita, apresentaremos a metodologia de pesquisa, que se ancorou nas perspectivas de estudo da historiografia da ciência, embora esta pesquisa não pretenda dar nenhuma contribuição original para esta área. Neste capítulo faremos uma contextualização dos materiais analisados. Além disso, faremos uma apresentação da história das teorias da relatividade, especial e geral, dando ênfase à TRG, que é o foco desta pesquisa.

Capítulo 3

Historiografia da ciência como metodologia de pesquisa

Este capítulo tem a intenção de apresentar a metodologia empreendida nesta pesquisa, sobretudo ancorada em uma perspectiva historiográfica. Para além de discutir os referenciais pertinentes para esta temática, pretendemos apresentar os materiais analisados: artigos, cartas, e trabalhos de divulgação de Einstein (que contêm reflexões epistemológicas sobre sua própria produção). Alguns destes últimos materiais aparecem, por exemplo, em análises de historiadores especialistas na obra de Einstein, como é o caso de John Stachel. Por último apresentaremos uma síntese sobre a história da relatividade, embasada em algumas autoridades a este respeito, como o próprio Stachel, Abraham Pais, Michel Paty e outros.

3.1. Considerações historiográficas

A partir da proposta desta pesquisa, investigar o papel das Narrativas e da Matemática no desenvolvimento do conhecimento científico, nosso trabalho se voltará à História da Ciência. Seguindo as perspectivas desta área, nossas considerações estarão restritas ao “capítulo” histórico que selecionamos. Isto será importante para que nossas conclusões não sejam “excessivamente reducionistas ou erroneamente generalizadas” (KARAM, 2012, p.12-13). O episódio histórico que investigaremos está relacionado à “gestação” da Teoria da Relatividade Geral.

O termo “gestação” surge como uma proposta de Gurgel (2010), que quer dizer um ponto intermediário entre a *concepção* e o *nascimento* de uma ideia. Consideramos este termo interessante, pois nos permite entender que a

construção e constituição de uma ideia não se dão em um momento completamente delimitado, em outras palavras, que a construção das ideias está além de um momento de *insight* (embora este momento possa ser importante). Assim, não focaremos o momento inicial de criação, em si, mas os passos iniciais para a estruturação de um conhecimento, quando o mesmo começa a ganhar forma para um público mais amplo, quando passa a circular pelo meio científico, tornando-se compreensível aos pares (GURGEL, 2010, 18).

Tomaremos, essencialmente, textos originais de Einstein como fonte da nossa investigação (principalmente os artigos e cartas, mas também alguns textos de divulgação). Eventualmente, trabalhos de comentadores da TRG e da obra de Einstein, de maneira geral, serão utilizados.

A diferenciação entre estes dois tipos de fontes de investigação (os textos originais e de comentadores) faz parte das metodologias de pesquisas historiográficas. É comum entre os historiadores da ciência tratar esta distinção como *fontes primárias* e *fontes secundárias*. Martins (2005), afirma que:

Em geral, é simples distinguir um tipo de outro. Por exemplo, se um historiador está estudando os trabalhos de Buffon onde aparecem suas idéias da hereditariedade, então as obras de Buffon e sua correspondência, assim como as obras científicas do período, serão consideradas como **fontes primárias**. Livros e artigos historiográficos recentes sobre Buffon e hereditariedade serão considerados como **fontes secundárias**. (MARTINS, 2005, p.310)

É preciso destacar que a pesquisa historiográfica pode seguir diferentes enfoques de investigação. Como uma distinção bastante geral, podemos pensar em enfoques “externalistas” e “internalistas”. Grosso modo, o enfoque externalista estaria mais atento às condições em que determinada teoria se desenvolveu: as influências culturais, problemas econômicos, conflitos de interesses, etc. O enfoque internalista, por sua vez, estaria mais interessado no percurso intelectual percorrido por determinado cientista até a consolidação de um dado conceito, por exemplo, como Planck chegou à ideia de quantização da ação dos harmônicos nas paredes de uma cavidade de corpo negro. Claramente estes enfoques não formam exatamente uma polarização. Um historiador

interessado na evolução de um determinado conceito científico não estará completamente alheio a aspectos externos à atividade científica propriamente dita. Assim como quem está interessado pelas interferências externas à ciência não estarão alheios à dinâmica epistemológica deste conhecimento.

Nossa pesquisa tomará como enfoque o interesse por características mais internas sobre o funcionamento da ciência, em particular, como o pensamento de um cientista se consolida para interpretar os fenômenos da Natureza. Tomaremos como objeto de análise a gestação de ideias da TRG de Einstein.

A análise será embasada, sobretudo, em artigos acadêmicos de Einstein. Dentre estes artigos, o principal será o artigo “Os fundamentos da Teoria da Relatividade Geral”, publicado originalmente na revista alemã *Annalen der Physics* em 1916. Este artigo é considerado o trabalho que apresenta a versão final do desenvolvimento da TRG. Nos referiremos a ele, portanto, como o “artigo fundador”. As ideias contidas neste artigo não surgiram apenas no contexto de sua elaboração, mas foi fruto de um tortuoso caminho que se iniciou em 1907, com um artigo de revisão da teoria da relatividade restrita, destinado à revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. Não tivemos acesso direto a este trabalho. Consideramo-lo a partir de importantes fontes secundárias, como John Stachel e Abraham Pais. O artigo em que Einstein propõe a curvatura da luz, intitulado “Sobre a influência da gravidade na propagação da luz”, também será analisado. Duas correspondências de Einstein farão parte da nossa análise, uma delas é uma carta escrita à Arnold Sommerfeld e será usada neste trabalho apenas como uma justificativa da importância de um experimento mental, em particular, para o desenvolvimento de ideias essenciais para a construção da TRG. Dos livros de divulgação de Einstein, destacamos a obra “*A teoria da Relatividade Especial e Geral*”, que foi publicado no final de 1916. Este livro, que foi destinado à divulgação da teoria que acabara de chegar em sua formulação final, tem relevância para o contexto desta pesquisa, principalmente pelo fato de Einstein apresentar nesta obra uma reconstrução dos passos dados em busca de suas teorias. Embora reconstruções deste tipo não possam ser tomadas acriticamente, elas são relevantes pela característica de Einstein de refletir sobre

sua produção, particularmente sob uma condição filosófica sofisticada. Assim, analisaremos os primeiros passos da publicização da Relatividade.

A seguir apresentamos uma síntese sobre a história da TRG, que será importante para a compreensão da análise de capítulos particulares desta empreitada científica.

3.2 História e formalismo da Relatividade Geral

A história da Teoria da Relatividade teve dois pontos de convergência importantes, um em 1905 e outro em 1915, quando foram elaboradas o que hoje chamamos de Teoria da Relatividade Restrita ou Especial (TRE) e Teoria da Relatividade Geral (TRG), respectivamente. Ao ser questionado sobre quais influências o teriam levado a construção das teorias da relatividade, Einstein apontou três questões que buscava responder (STACHEL, 2002/1979 b, p.233):

1. Como a representação de um raio de luz depende do estado de movimento do sistema de coordenadas ao qual é referido;
2. Quais são as bases da igualdade das massas inercial e gravitacional;
3. se os campos gravitacional e eletromagnético podem ser compreendidos como um esquema unificado;

A busca por responder a primeira questão conduziu Einstein à TRE. A segunda questão foi o ponto inicial da busca pela generalização da Teoria da Relatividade. A terceira, apesar de aparecer no artigo fundador, de 1916, tem maior influência nas investigações de Einstein posteriores à Relatividade, em particular sua busca por uma teoria de campos unificados, que não trataremos neste trabalho.

Considerações a respeito da história da TRE

Muitas são as especulações acerca do surgimento da teoria da Relatividade Especial de Einstein. Em livros textos, por exemplo, é comum a presença de reconstruções históricas, criadas muitas vezes para que haja um encadeamento lógico entre os acontecimentos. Isto pode resultar em uma imagem do

desenvolvimento do conhecimento científico com se ele fosse linear. Estas “distorções” incorrem, por vezes, em anacronismos, inversões cronológicas e interpretações dogmáticas. Embora essas *quasi-histórias* sejam criadas com intenções didáticas é necessário que permaneçamos vigilantes e que busquemos alternativas que incorporem o uso da história da ciência com versões da dinâmica interna da ciência menos estereotipadas.

Alguns autores tratam essas visões estereotipadas da dinâmica interna da ciência como *mitos*, como faz o historiador da ciência Oliver Darrigol (2005), por exemplo. Em um artigo sobre a gênese da TRE, Darrigol (2005) menciona pelo menos três mitos acerca do desenvolvimento desta teoria. Os principais mitos, ou mais difundidos, de acordo com o autor, são:

- 1- A descoberta da TRE foi um golpe único de gênio, desafiando qualquer análise racional;
- 2- Havia uma necessidade lógica da teoria, que resultou em uma explicação teórica a um problema empírico. De acordo com este mito, a TRE teria surgido a partir das experiências “mal sucedidas” acerca das teorias do éter. A experiência do éter arrastado teria permitido o surgimento do princípio da relatividade, enquanto as experiências de Michelson-Morley teriam permitido o postulado da constância da velocidade da luz.
- 3- Um terceiro mito é de caráter idealista. Tende a exagerar o papel do criticismo filosófico de conceitos básicos (espaço e tempo), com influências de David Hume e Ernst Mach.

Um historiador crítico, segundo Darrigol, não pode crer absolutamente em mitos como estes, apesar deles, em algum grau, apresentarem algo de verdadeiro. O primeiro (genialidade do cientista), por exemplo: é comum em discursos vazios acerca do ensino de aspectos relacionados à natureza da ciência que se fale em “exterminar” a visão de cientista como gênio. De certa maneira concordamos com esta afirmação, no entanto, há de se atentar para não depreciar demasiadamente

a subjetividade/individualidade de cada cientista, subjulgando sua contribuição pessoal. Em outras palavras, há certa “pitada” de genialidade de alguns expoentes da ciência, tais como Einstein, para o desenvolvimento do conhecimento científico. Com relação ao segundo mito (empiricismo): é importante considerar que à época do desenvolvimento da TRE, século XIX e início do XX, muitos experimentos, principalmente ópticos, faziam parte do contexto de produção do conhecimento científico. O mito surge, em nossa opinião, quando é creditada exclusivamente à experiência a evolução/surgimento das teorias físicas. O terceiro mito (influência filosófica da teoria) também tem aspectos verdadeiros e que devem ser considerados. De fato, Einstein foi fortemente influenciado pelos filósofos David Hume e Ernst Mach, em especial, pelas críticas que estes filósofos fizeram às concepções newtonianas de tempo e espaço. Em uma passagem de suas notas autobiográficas, Einstein comenta sobre sua influência filosófica para a formulação da TRE: “*O tipo de raciocínio crítico necessário para a descoberta desse ponto central [Caráter não absoluto do tempo, ou da simultaneidade] foi, no meu caso, enriquecido especialmente com a leitura das obras filosóficas de David Hume e de Ernst Mach*” (EINSTEIN, 1982, p. 56). No entanto, novamente devemos nos atentar para não nos prendermos em apenas uma face de um contexto complexo de produção de conhecimento, isto é, não foi apenas a crítica filosófica que levou ao desenvolvimento da TRE, muito embora ela tenha desempenhado papel fundamental.

Apesar de inserida em um contexto em que os experimentos desempenhavam papel importante, a TRE surge, principalmente, como uma aspiração teórica. De maneira geral, a TRE surge como a tentativa de superar incompatibilidades entre duas grandes teorias consolidadas à época: Eletromagnetismo (de Maxwell, principalmente) e Mecânica (em especial as bases cinemáticas da teoria de Newton). A figura a seguir, proposta pelo historiador da ciência Jürgen Reen, ilustra o que acabamos de afirmar.

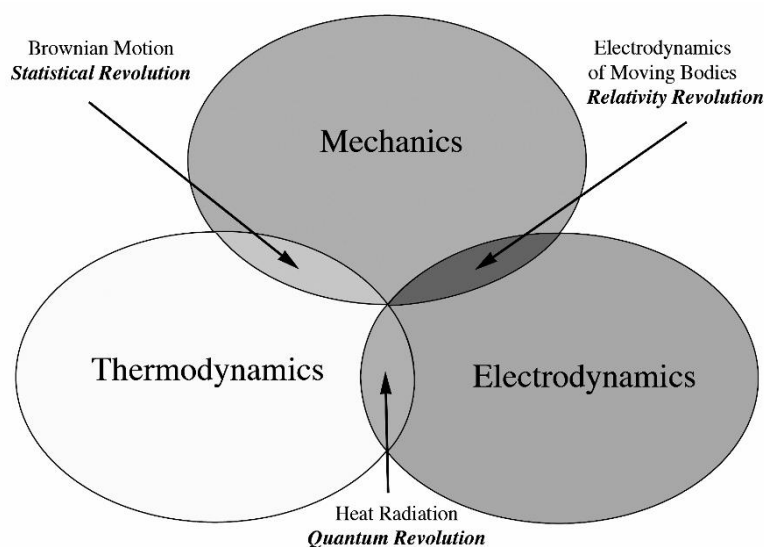


Figura 1 - Revoluções nos problemas de fronteira da Física Clássica (RENN, 2007, p, 31)

O entendimento de que essas teorias apresentam incongruências coincide com a busca pela resposta da primeira questão apresentada por Einstein, sobre suas influências na busca da TRE. De acordo com ele próprio, em suas notas autobiográficas, isto teve início com um experimento de pensamento¹⁷ elaborado ainda em sua adolescência:

Após dez anos de estudo, o princípio [de relatividade] surgiu, resultando de um paradoxo com o qual me defrontara quando tinha dezesseis anos: se um raio luminoso for perseguido a uma velocidade c (velocidade da luz no vácuo), observamos esse raio de luz como um campo eletromagnético em repouso, embora com oscilação espacial. Entretanto, aparentemente não existe tal coisa, quer com base na experiência, quer de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início, tive a intuição clara de que, segundo o ponto de vista desse observador, tudo devia acontecer de acordo com as mesmas leis aplicáveis a um observador que estivesse em repouso em relação à terra. Pois, como poderia o primeiro observador saber ou determinar que está em estado de movimento rápido uniforme? (EINSTEIN, 1982, p.55)

A certa altura, Einstein ficou convencido de que não seria possível superar este paradoxo considerando simplesmente o que havia sido desenvolvido até então. Surgia, assim, a necessidade de mudanças radicais, no sentido de discutir sobre as raízes do conhecimento físico, sobre seus fundamentos. Havia a

¹⁷ Einstein é conhecido por utilizar muitos experimentos de pensamento no desenvolvimento do conhecimento científico, não só na TRE, mas também, como veremos, na elaboração da TRG.

necessidade do surgimento de uma nova teoria, pois os esforços construtivos para conciliar o eletromagnetismo e a mecânica não poderiam ser “frutíferos”.

Esse tipo de raciocínio levou-me a concluir [...] que nem a mecânica e nem a eletrodinâmica podiam (exceto nos casos limites) reivindicar validade exata. Gradualmente perdi a esperança de descobrir as leis verdadeiras através dos esforços construtivos, baseado em fatos conhecidos. Quanto mais me dedicava a esse objetivo, mais me convencia de que só a descoberta de um princípio formal universal poderia levar a resultados seguros e positivos. (EINSTEIN, 1982, p.54)

O paradoxo que apresentamos anteriormente foi, de acordo com Einstein, fundamental para a descoberta deste princípio formal universal: [...] *Vemos nesse paradoxo o germe da teoria da relatividade restrita*” (EINSTEIN, 1982, p.55). Este paradoxo configura-se, sobretudo, como uma aparente incompatibilidade entre a lei da constância da velocidade da luz e o princípio de relatividade. Sua superação dependia particularmente da superação da crença no caráter absoluto do tempo, no caráter absoluto da simultaneidade. Como já apontamos, a superação destes obstáculos foi proporcionada, em especial, pela influência filosófica de Hume e Mach (EINSTEIN, 1982, p.56).

Desta maneira, a relatividade do conceito de simultaneidade configura-se como uma das bases da TRE, e um dos aspectos que mais desafiaram o paradigma vigente até então. O intervalo de tempo t entre dois eventos em um sistema de referencia S , devia coincidir com um intervalo de tempo t' no sistema de referencia S' , de modo que t nunca seria diferente de t' . Ou seja, se dois eventos são simultâneos em um dado referencial inercial, seriam simultâneos em qualquer outro sistema de referência inercial que se adotasse, de acordo com a concepção da física clássica. Matematicamente podemos dizer que a transformação (galileana) de coordenadas para o tempo é: $t = t'$. Com as novas bases cinemáticas apresentadas pela TRE isto não é mais verdade, sendo que as medidas de tempo passam a depender do sistema de referência escolhido. A relação entre essas coordenadas não são mais feitas a partir das transformações galileanas, mas pelas *transformações de Lorentz*.

A TRE foi estruturada a partir de princípios (STACHEL, 2002/1979 a, p.225). Neste sentido, o físico alemão frequentemente a comparava com a Teoria da Termodinâmica (idem, p.226). São dois os princípios que fundamentam a TRE:

I. Princípio de Relatividade

Este princípio pode ser entendido como uma expansão do princípio de relatividade da mecânica clássica. As leis da mecânica de Newton dizem que as leis de movimento com relação a referenciais inerciais¹⁸ são as mesmas para todos os corpos. Isto é, todos os referenciais inerciais são mecanicamente equivalentes. Einstein, por outro lado, postulou que os referenciais inerciais são equivalentes para a descrição de quaisquer leis da natureza. Ou seja, as leis da física, do eletromagnetismo em particular, são válidas em qualquer referencial inercial.

II. Princípio da constância da velocidade da luz

Einstein postulou que a velocidade da luz com relação a um referencial inercial é independente do movimento da fonte de luz. Em conjunto com o primeiro princípio, portanto, temos a implicação de que a velocidade da luz deve ser constante em todos os referenciais inerciais.

O desenvolvimento do primeiro princípio tem relação próxima com o desenvolvimento da física do século XVIII e XIX, particularmente o problema da óptica dos corpos em movimento. Esta influência foi declarada por Einstein em uma palestra em Kyoto, em 1922:

Foi há aproximadamente 17 anos [1905] que veio a mim a idéia de tentar desenvolver o princípio de relatividade. Está claro que não posso dizer de maneira definitiva de onde esta idéia veio. Estou certo, porém, que ela originou do problema da óptica de corpos em movimento (EINSTEIN *apud* STACHEL, 2005, p.585)

Ou seja, embora a principal motivação para o desenvolvimento da TRE seja teórica, em especial buscando superar contradições entre mecânica e

¹⁸ Para Newton há um referencial privilegiado, o espaço absoluto. Um referencial inercial, para Newton, é aquele que está parado ou com velocidade constante com relação ao espaço absoluto.

eletromagnetismo, podemos notar que o contexto empírico também teve particular importância, principalmente os experimentos ópticos. Estas considerações são relevantes para que possamos problematizar minimamente o *mito* de que a TRE seja uma resposta direta ao “fracasso” dos experimentos de Michelson e Morley, mas sem deixar, no entanto, de considerar a importância dos experimentos de interferometria.

Também é necessário problematizar algumas versões “pseudo-históricas” que desconsideram importantes contribuições de outros cientistas na construção da TRE, tais como Hendrik A. Lorentz (1853-1928) e Henri Poincaré (1854-1912). Lorentz, além de propor as transformações de coordenadas que levam seu nome, citada anteriormente, deu contribuições importantes para a física teórica, entre elas a reformulação das equações de Maxwell e a construção da Teoria do Elétron. Seu trabalho sobre eletrodinâmica de 1895 foi lido por Einstein e exerceu-lhe grande influência. Poincaré também influenciou os pensamentos de Einstein de maneira significativa, por exemplo, com discussões a respeito das regras e definições de simultaneidade (NORONHA, 2014).

O desenvolvimento da relatividade não termina em 1905, mesmo considerando apenas a TRE. Uma das contribuições mais notáveis feita em prol do desenvolvimento da TRE após 1905 foi feita por Minkowski, que desenvolveu o formalismo com o qual estamos habituados hoje e que seria imprescindível para a construção da TRG: o formalismo quadridimensional.

Também houve a busca pela TRG, empreitada particularmente empreendida por Einstein, que entre caminhos sinuosos só se consolidou, de fato, dez anos após a descoberta da TRE.

História da Teoria da Relatividade Geral

Podemos considerar que a TRG surge como uma forma de superar as limitações da TRE. Uma das mais notáveis restrições da teoria especial está na predileção pelos referenciais inerciais. O princípio de relatividade da TRE deixa claro o campo de validade das leis físicas: *As leis físicas são invariantes para*

quaisquer referenciais inerciais. O incômodo com esta restrição por parte de Einstein pode ter sido originado, também, pela influência da filosofia de Mach, visto que este filósofo, além de criticar o tempo e espaço absoluto, também colocava em xeque a preferência dada pela mecânica newtoniana aos referenciais inerciais (preferência esta que foi estendida para TRE).

Após a teoria restrita estar consolidada houve uma busca pela generalização, isto é, buscava-se a validade das leis físicas para os referenciais não inerciais também. Em outras palavras, buscava-se a extensão do princípio de relatividade. Para Einstein, a busca pela generalização parece um passo natural para o cientista: “*Depois de se haver comprovado o princípio da relatividade especial, é tentador para toda mente que aspira à generalização dar o passo em direção ao princípio da relatividade geral*” (EINSTEIN, 1999, p.55).

Outro fator de extrema importância para considerarmos a TRE limitada é a falta da gravitação em sua estrutura. Einstein declarou que a percepção desta limitação foi um dos primeiros passos para a construção da TRG: “*O fato de ser a teoria da relatividade restrita apenas o primeiro passo de um desenvolvimento necessário só se tornou evidente para mim quando procurei representar a gravitação na estrutura dessa teoria*” (EINSTEIN, 1982, p.63). Abraham Pais (1993/1982, p. 223) aponta que Einstein sentiu a falta da gravitação na TRE, particularmente, ao trabalhar em uma síntese desta teoria, dois anos após sua publicação (portanto, em 1907), destinada a uma revista científica. Referiremos a este trabalho de 1907 como *Jahrbuch*. Pais (1993) baseia-se na seguinte declaração de Einstein:

Quando, em 1907, trabalhava num artigo de síntese sobre a teoria da relatividade restrita para o *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, tive também de tentar modificar a teoria newtoniana da gravitação de modo que as respectivas leis se enquadrassem na teoria [da relatividade restrita]. Algumas tentativas nesse sentido mostraram-me que tal poderia ser feito, mas não me satisfizeram, porque estavam baseadas em hipóteses sem fundamento físico. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1993, p. 224)

Um ponto importante a ser destacado é que as duas limitações a que nos referimos, limitação do princípio de relatividade e ausência da gravitação, têm ligação entre si. Isto é, a generalização da relatividade passava pela inclusão da gravitação. Pais (1993/1982, p.226) levanta a seguinte questão a este respeito: “*Terá Einstein sido conduzido inicialmente à gravitação porque queria incluí-la na relatividade restrita ou porque viu que poderia generalizar a relatividade restrita através dela?*” A resposta de Pais (idem) é que “procurando a inclusão imediatamente, ou quase imediatamente, [Einstein] chegou à generalização”.

Jürgen Renn (2007, p.59-60) e John Stachel (2002, p.261) referem-se ao desenvolvimento da TRG como um “drama em três atos”. Esta analogia é baseada em uma lista, escrita em 1920, em que Einstein aponta suas ideias científicas mais importantes. Dentre essas ideias, destacam-se três com relação à TRG, organizadas cronologicamente como se segue:

- 1907 - Ideia básica para a teoria da relatividade geral: Princípio de Equivalência;
- 1912 - Reconhecimento da natureza não euclidiana da métrica e sua determinação física pela gravitação;
- 1915 - Equações de campo da gravitação. Explicação do movimento do periélio de Mercúrio;

Stachel (2002, p.261) descreve essas três ideias como “três atos de um drama clássico”, da seguinte maneira:

- ✓ ATO I (1907): A formulação do Princípio de Equivalência;
- ✓ ATO II (1912): Representação matemática do campo gravitacional por um tensor simétrico de segunda ordem, que entra no elemento de linha (ds) de um espaço-tempo quadri-dimensional;

- ✓ ATO III (1915): Formulação das equações de campo, agora padrão (*now-standard*), para o campo métrico, e o uso de sua solução esfericamente simétrica para explicar a precessão anômala do periélio de Mercúrio.

Como foi apontado por Einstein, uma das motivações pela busca da TRG era compreender os fundamentos da igualdade entre massa inercial e massa gravitacional, que já eram numericamente equivalentes na física clássica, mas sem que se soubesse nada sobre os fundamentos de tal fato. O primeiro passo (ATO I) para a extensão do princípio de relatividade foi dado quando Einstein, em 1907, apresentou discussões a respeito de um campo gravitacional estático (STACHEL, 2002/1979 a, p.227). Esta discussão apresentava argumentos que embasam o que hoje conhecemos como *princípio de equivalência* (PE). Um ponto importante para a formulação do PE foi a percepção de Einstein que um corpo em queda livre não sente o próprio peso¹⁹. Esta ideia que inicialmente pode parecer desprezível pela simplicidade desempenhou papel fundamental na elaboração da TRG. Einstein considerou esta ideia o pensamento mais feliz de sua vida (PAIS, 1993/1982, p.223), referindo-se a este feliz experimento mental da seguinte maneira:

Estava sentado numa cadeira na repartição de patentes em Berna quando de súbito me ocorreu um pensamento: se uma pessoa cai livremente, não sente o próprio peso. Fiquei abismado. Este simples pensamento provocou-me uma impressão profunda. Impeliu-me para a teoria da gravitação. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1993, p.225)

O PE é, basicamente, a “chave” para relacionar os referenciais acelerados com os referenciais inerciais sob a ação de um campo gravitacional. Os detalhes serão discutidos na análise dos textos de Einstein.

Já em 1907, Einstein tinha desenvolvido ideias que permaneceriam, de certa maneira, até a elaboração final da TRG em 1915. Na seção V do *Jahrbuch* Einstein apresenta três pontos principais: Princípio de Equivalência; O desvio

¹⁹ Esta ideia nos parece tão fundamental para a compreensão histórica e conceitual da TRG que nos empenhamos em desenvolver uma atividade que buscasse discutir este aspecto. O trabalho foi apresentado no XXI SNEF e pode ser encontrado nos anais do evento a partir do seguinte link: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxi/sys/resumos/T0166-1.pdf>

gravitacional para o vermelho; encurvamento da luz (PAIS, 1993/1982, pp.226-7-8). Com relação ao PE Einstein apresenta o argumento habitual: Um sistema de referência, Σ_1 , está acelerado na direção de x , com aceleração constante, γ . Um segundo referencial, Σ_2 , está em repouso num campo gravitacional homogêneo que comunica a mesma aceleração - γ na direção de x a todos os objetos. Com relação a estes referenciais, Einstein considera o seguinte:

No actual estado experimental não há razão para supormos que [...] Σ_1 e Σ_2 sejam distintos em algum aspecto, e no que se segue vamos, conseqüentemente, *supor a completa* equivalência física de um campo gravitacional e da correspondente aceleração do sistema de referência [Σ_1]. Esta suposição generaliza o princípio de relatividade ao caso de um referencial com movimento uniformemente acelerado (EINSTEIN *apud* PAIS, 1993/1982, p.226)

O físico alemão não vai além destas considerações em um primeiro momento. Avalia que o *Jahrbuch* não é adequado para uma abordagem completa das questões que lhe surgiram, especialmente por se tratar de um trabalho de revisão da TRE (PAIS, 1993/1982, p.227). O PE, presente no *Jahrbuch*, permitiu conclusões surpreendentes, como a curvatura da luz em um campo gravitacional (RENN, 2007, p. 21). Contudo, neste momento Einstein não via nenhuma forma para confirmar esta previsão (STACHEL, 2002/1979a, p. 228), mas, como veremos adiante, ele retomaria esta questão em um artigo publicado em 1911²⁰, no qual propõe que raios de luz de uma estrela distante devem curvar-se ao passar rasantes ao sol. Entre 1907 e 1911 a TRG, de acordo com Pais (1993/1982, p. 235), Stachel (2002/1979 a, p.228) e Paty (2008, p.73), ficou no *background* das atividades de Einstein. Os principais motivos apontados pelos autores para tal fato são: Einstein foi, finalmente, admitido em um cargo acadêmico em 1908 (pede demissão do escritório de patentes em 1909). Com o novo cargo surgiram novas demandas e o tempo para a pesquisa ficou mais escasso. Ainda assim, o novo cargo não foi o único ou principal motivo que desviara a atenção de Einstein dos problemas da Gravitação. Neste período ele se dedicou intensamente a encontrar soluções para os enigmáticos problemas da Quântica.

²⁰ Artigo publicado na revista *Anellen der Physik*

Somente em 1911 Einstein voltou a se dedicar fortemente no problema da gravitação e da TRG, a propósito da curvatura da luz num campo de gravitação (PATY, 2008, p.73), apresentado em seu artigo *Sobre a Influência da Gravidade na Propagação da Luz* (EINSTEIN, 1983/1911). Como já foi adiantado, uma das coisas que chama a atenção neste artigo de 1911 é que Einstein propõe uma maneira de fazer experiências que poderiam testar a teoria que estava sendo desenvolvida: observar a luz de uma estrela que passa rasante ao sol em direção à terra. Na introdução do artigo, Einstein considera o seguinte a este respeito:

Já num artigo apresentado há quatro anos [refere-se ao *Jahrbuch*] eu procurei responder à questão da possível influência da gravidade sobre a propagação da luz [a partir do PE]. Volto agora a este tema, porque não me satisfaz a forma por que então tratei o assunto e, mais ainda, **porque vejo agora que uma das mais importantes consequências daquelas considerações pode ser submetida à verificação experimental**. Refiro-me ao facto de os raios de luz que passam na proximidade do sol sofrerem no seu campo de gravidade, segundo a teoria que se vai apresentar, um desvio tal, que a distância angular entre o sol e uma estrela fixa observada na sua proximidade é vista com um aumento aparente de quase 1 segundo de arco. (EINSTEIN, 1983/1911, p. 127, negrito nosso).

Naturalmente a observação referida deveria ser feita durante a ocorrência de um eclipse, para que a luz do sol não impedisse a possibilidade de vermos a luz proveniente da estrela distante. Uma expedição de cientistas alemães observaria um eclipse solar na Ucrânia em 1914. No entanto, com a eclosão da Primeira Guerra Mundial, as autoridades russas não permitiram que o experimento se concretizasse (STACHEL, 2002/1979a, p. 228). A previsão da deflexão do raio de Luz próximo à região do campo gravitacional do sol, no artigo de 1911, foi de *0,83 segundo de arco* (EINSTEIN, 1983/1911, p.139). Este resultado representa metade da deflexão prevista na formulação final TRG, em 1915. O que teria ocorrido se as autoridades russas não tivessem barrado a experiência em 1914? O fato é que apenas em 1919, com expedições à ilha do Príncipe, na África, e à Sobral, no Brasil, lideradas pelo importante astrônomo inglês Arthur Eddington, que as previsões (de 1915) a respeito da deflexão da luz em campos de gravitação puderam ser confirmadas.

Um desdobramento interessante deste artigo de 1911 está relacionado à constância da velocidade da luz, um dos princípios fundamentais da TRE. Após discutir a influência do campo gravitacional na medição de relógios, Einstein chega, utilizando o PE como argumento fundamental, à expressão da velocidade da luz dependente do potencial gravitacional ϕ .

$$c = c_0 \left(1 + \frac{\phi}{c^2} \right)$$

A partir desta expressão Einstein conclui que “*o princípio da constância da velocidade da luz não é, pois, segundo esta teoria, válido na forma que usualmente se põe na base da teoria habitual da relatividade [TRE]*” (EINSTEIN, 1983/1911, p. 137).

Até este momento, no entanto, Einstein ainda não havia reformulado as bases matemáticas que estruturariam a TRG. Passemos, então, ao ATO II. Como vimos, Einstein queria estender a validade do PR para quaisquer sistemas de referência. Neste contexto havia um tipo particularmente importante a ser considerado: os referenciais em rotação. A aparente natureza absoluta da rotação foi uma das peças importantes para Newton avançar ao espaço absoluto, e o problema da rotação também foi muito proeminentemente discutido por Mach. Einstein precisava estender o argumento usado em 1907 (PE do *Jahrbuch*) de aceleração retilínea uniforme à rotação (BARBOUR, 1992, p. 130). A primeira evidência que se conhece sobre a necessidade e importância de tratar os referenciais em rotação na TRG encontra-se em uma carta de Einstein a Arnold Sommerfeld, datada de 29 de Setembro de 1909. Nesta carta Einstein diz o seguinte:

O tratamento do corpo rígido que roda uniformemente parece-me ser muito importante devido à extensão do princípio de relatividade a sistemas que rodam uniformemente, cujo raciocínio tentei prosseguir para o caso da translação uniformemente acelerada na última seção do meu artigo de 1907 [*Jahrbuch*] (EINSTEIN *apud* PAIS, 1993, p.239).

A primeira coisa que podemos notar é que a TRG não ficou alheia aos pensamentos de Einstein no período compreendido entre 1908 e 1911, mesmo este tendo sido um período em que ele se dedicou mais à Quântica. Esta carta de Einstein surge no contexto das discussões acerca dos corpos rígidos na TRE, em especial, influenciado pelos trabalhos de Max Born²¹. O problema do disco rígido em rotação foi tratado simultaneamente por Paul Ehrenfest, em um artigo submetido exatamente no dia 29 de setembro de 1909 (mesma data da carta de Einstein à Sommerfeld). O problema do disco rígido em rotação ficou conhecido na literatura como “Paradoxo de Ehrenfest” (STACHEL, 2002/1980, p.246). Somente em 1912 Einstein publicou oficialmente (artigo acadêmico) a ideia do disco rígido em rotação, no artigo *The Speed of Light and the Statics of the Gravitational Field*, publicado na revista *Annalen der Physik*²².

De acordo com a hipótese da equivalência [PE], um sistema de referência K é estritamente equivalente a um sistema em repouso em que há um campo gravitacional de um tipo específico. As medidas espaciais de K são realizadas por réguas que – quando comparada com outra régua em estado de repouso na mesma localização de K - possuem o mesmo comprimento; as leis da geometria [euclidiana] devem vigorar para comprimentos assim obtidos, portanto, também para as relações entre as coordenadas x, y, z e outros comprimentos. Esta condição não é permitida como um fato, claro; de fato, isto contém suposições físicas que podem possivelmente provar estarem erradas; **por exemplo, ela muito provavelmente não vigora em um sistema com rotação uniforme em que, devido à contração de Lorentz, a razão entre a circunferência e o diâmetro teria de ser diferente de π se nossa definição for aplicada.** (EINSTEIN, 1996/1912, p. 96, tradução e negrito nosso)

Existem muitas referências ao disco rígido em rotação nos artigos de Einstein, bem como em suas correspondências (STACHEL, 2002/1980, p.247), em especial no artigo de revisão de 1916, em que Einstein apresentou a versão final da TRG. Os detalhes deste importante experimento de pensamento serão discutidos na análise desta dissertação. Segundo Stachel (2002/1980, p.245), a

²¹Born, Max (1909). “Über die Dynamik des Elektrons in der Kinematik des Relativitätsprinzips.” *Physikalische Zeitschrift* 10: 814-817.

Born, Max (1910). “Über die Definition des starren Körpers in der Kinematik des Relativitätsprinzips.” *Physikalische Zeitschrift* 11: 233-234.

²² Título original em Alemão: *Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes*

importância do disco rígido em rotação pode ser considerada, sobretudo, pelo seu papel na cadeia de raciocínio que levou Einstein à ideia de que uma métrica não plana do espaço-tempo era necessária para o tratamento relativístico do campo gravitacional. Como registrou Einstein um ano após da publicação de seu artigo de revisão da TRG em 1916, uma das conclusões mais importantes que chegou com base no experimento de pensamento do disco rígido em rotação foi que “[...] *as proposições da geometria euclidiana não podem ser perfeitamente válidas sobre um disco em rotação e, portanto, de maneira geral, em um campo gravitacional*” (Einstein 1999/1916, p.82). Nesta mesma obra dedica um capítulo específico para a discussão do experimento de pensamento do disco em rotação. E em capítulos imediatamente seguintes, trata do “contínuo euclidiano e não euclidiano” e das “coordenadas gaussianas”. Como comenta Stachel (2002/1980, p.249), esta sequência de temas curiosamente se repete no discurso de Einstein em outras obras (Einstein 1984/1922, Einstein & Infeld 2008/ 1938), inclusive no artigo fundador de 1916. Isto ilustraria como este experimento mental teria tido papel fundamental em seu entendimento sobre a necessidade de geometrias não-euclidianas e da generalização do princípio de relatividade ao tratamento relativístico da gravitação. Nesta etapa do desenvolvimento da TRG, Einstein precisou de auxílio para buscar fundamentos matemáticos coerentes com a teoria física que estava desenvolvendo. Marcell Grossmann, colega de Einstein desde os tempos de ETH (graduação), foi quem mais ajudou Einstein nesta empreitada. A fala de Einstein em Quioto, em 1922, demonstra as dificuldades por ele enfrentadas, no que diz respeito à validade da Geometria Euclidiana, e a ajuda empreendida pelo seu amigo matemático:

Se todos os sistemas [acelerados] são equivalentes, então a geometria de Euclides não pode ser válida em todos eles. Deitar fora a geometria e conservar as leis [físicas] equivale a descrever pensamentos sem palavras. Temos de procurar palavras antes de podermos exprimir ideias. Que devemos procurar nesta altura? Este problema permaneceu para mim insolúvel até 1912, quando, subitamente, vi que a teoria de Gauss tinha um significado profundo. Todavia, não sabia então que Riemann tinha estudado as bases da geometria de um modo ainda mais profundo. De repente lembrei-me de que a teoria de Gauss estava incluída no curso de geometria dado por Geiser quando era estudante

[...] Compreendi que os fundamentos da geometria têm significado físico. O meu querido amigo, o matemático Grossmann, estava lá quando regresssei de Praga a Zurique. Por ele soube pela primeira vez de Ricci e, mais tarde, de Riemann. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1993, p.269, grifos nossos)

A importante participação de Grossmann na elaboração da TRG, especialmente relacionada aos aspectos matemáticos da teoria, pode ser evidenciada pelo fato de Einstein ter publicado artigos em parceria com o matemático suíço, principalmente se considerarmos que publicações em parceria não foi uma característica recorrente na carreira de Einstein.

O drama da TRG chegou a um ponto culminante em 1912, afirma Renn (ano, p. 59-60), quando Einstein introduziu um tensor métrico de 10 componentes como uma representação do potencial gravitacional, substituindo sua representação na física clássica como uma única função escalar. De acordo com Pais (1993, p.265), Einstein já tinha em mente, desde de 1912 (antes das colaborações com Grossmann), que precisava da teoria das invariantes e co-variantes²³ associada ao elemento diferencial de linha

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

no qual as dez quantidades $g_{\mu\nu}$ devem ser consideradas campos dinâmicos que, de algum modo, descrevem a gravitação. Até então Einstein estava utilizando coordenadas gaussianas. A geometria de Riemann lhe foi apresentada por Grossmann. O matemático suíço, no entanto, apontou para o fato de que as equações diferenciais da geometria de Riemann eram não lineares, o que ele considerava uma má característica. Para Einstein, na verdade, esta era uma grande vantagem (PAIS, 1993, p.266). De acordo com o próprio Einstein, o passo

²³ Em matemática e em física teórica, **invariância** é uma propriedade de um sistema e suas grandezas, as quais permanecem imutáveis independentemente de transformações. A velocidade da luz, por exemplo, é uma grandeza invariante sob transformações de Lorentz. As equações de Maxwell são invariantes sob esse mesmo tipo de transformações, ou seja, a forma das equações de Maxwell não mudam quando fazemos transformações de Lorentz. A **covariância** pode ser entendida como uma generalização da propriedade de **invariância** para matemática de tensores. Einstein buscava, com a TRG, a covariância das equações de campo.

para as equações geralmente co-variantes foi decisivamente influenciado pelo experimento do disco rígido em rotação.

O passo decisivo da transição para as equações geralmente co-variantes não teria certamente ocorrido [se não fosse o raciocínio que se segue]. Devido à contração de Lorentz num sistema de referência que roda em relação a um sistema inercial, as leis que regem os corpos rígidos não correspondem às regras da geometria euclidiana. Portanto, temos de abandonar a geometria euclidiana se quisermos considerar sistemas não inerciais em pé de igualdade. (EINSTEIN *apud* PAIS, 1993, p. 267)

A partir das reflexões apresentadas, e outras, além das investigações e interpretações das geometrias não euclidianas, com a ajuda de Grossmann, que Einstein pôde, no final de 1915, “representar a gravitação pelo tensor métrico de espaço-tempo em quatro dimensões (‘equação de Einstein’), exprimindo assim plenamente o caráter geométrico da gravitação” (PATY, 2008, p.76). Apresentamos abaixo a equação covariante do campo gravitacional, ou “equação de Einstein”.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

O tensor $G_{\mu\nu}$ é chamado de “tensor de Einstein”, ele depende do tensor de curvatura de Ricci (que não está representado nesta equação), do tensor métrico, que descreve a curvatura local do espaço-tempo, e da constante cosmológica²⁴. A gravidade se dá em termos deste tensor, que descreve as propriedades geométricas do espaço-tempo quadri-dimensional. Além das constantes desta equação (o número pi, a velocidade da luz no vácuo e a constante gravitacional, mesma da gravitação newtoniana), temos o tensor $T_{\mu\nu}$, chamado de tensor tensão-energia, que descreve a matéria e energia em um dado ponto do espaço-tempo. Ou

²⁴ Essa constante cosmológica foi a maneira que Einstein encontrou para “frear” o universo. À época da construção da TRG não havia indícios de que o universo estava em expansão. Algumas soluções possíveis da equação de Einstein indica isto, mas Einstein acrescentou esta constante, pois o resultado parecia não estar de acordo com o mundo físico. De Sitter foi um dos cientistas que problematizou o sentido físico desta constante. Ver (BAGDONAS et al., 2013).

seja, nesta equação temos do lado esquerdo uma referência à geometria do espaço-tempo, enquanto o lado direito faz referência à distribuição de energia e momento na malha espaço-temporal. Uma interpretação interessante desta equação é dada pelo físico John Wheeler, que dizia que “lendo da esquerda para direita, temos o espaço-tempo dizendo como a matéria deve se mover, lendo da direita para esquerda, temos a massa dizendo como o espaço-tempo deve se curvar” (CREASE, 2011, p.175).

Estes tensores presentes na equação de Einstein, são tensores simétricos de 4 X 4, de modo que têm 10 componentes independentes. Vejamos o caso do tensor métrico $g_{\mu\nu}$. Os índices μ e ν variam de 0 a 3, ou de 1 a 4, dependendo da convenção que se adote. Adotando a primeira podemos representar este tensor pela matriz que se segue:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} g_{00} & g_{10} & g_{20} & g_{30} \\ g_{01} & g_{11} & g_{21} & g_{31} \\ g_{02} & g_{12} & g_{22} & g_{32} \\ g_{03} & g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix}$$

Como se trata de um tensor simétrico, temos que $g_{01} = g_{10}$; $g_{02} = g_{20}$ e assim por diante, restando, portanto, apenas 10 componentes independentes.

No espaço plano de Minkowski, que é o caso da TRE, com coordenadas $x^\mu \rightarrow (x^0, x^1, x^2, x^3) = (ct, -x, -y, -z)$, a métrica é escrita da seguinte maneira:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Outra métrica conhecida é a de Schwarzschild, que descreve o espaço-tempo ao redor de um corpo esfericamente simétrico, como um planeta ou um buraco negro, por exemplo. Com coordenadas $(x^0, x^1, x^2, x^3) = (ct, r, \theta, \varphi)$, podemos escrever a esta métrica da seguinte maneira:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

Onde G é a constante gravitacional e M representa a massa-energia total contida no objeto central.

A solução esfericamente simétrica da equação de Einstein resolvia um antigo problema da física newtoniana: a precessão do periélio de Mercúrio. Em termos de valores absolutos a mecânica de Newton oferecia um resultado razoavelmente próximo ao observado. Havia uma discrepância de apenas 43" por século entre o valor previsto e observado. Somente com a TRG esta discrepância pôde ser explicada. Os resultados teóricos da TRG, da precessão do periélio de Mercúrio entre outros, em concordância com o mundo empírico foi um dos aspectos de sucesso desta teoria.

A seguir apresentaremos a análise de alguns capítulos importantes da elaboração da TRG, a saber, a formulação do Princípio de Equivalência, o abandono da geometria euclidiana e distorções do espaço-tempo. Nossa análise focará, especialmente, na formulação de experimentos mentais fundamentais. Investigaremos como os pensamentos narrativo e matemático se apresentam nestes experimentos mentais.

Capítulo 4

Investigando o papel da Matemática e da Narrativa na Geração da TRG

Apresentamos a seguir uma análise de textos de Einstein à luz dos fundamentos que foram apresentados, principalmente, no capítulo 2. Nossa análise foca a elaboração de alguns importantes experimentos mentais que resultaram em ideias importantes desta teoria: Princípio de Equivalência e distorção do espaço-tempo. Apresentamos, também, a análise de um texto relacionado à cosmologia einsteiniana que discute, sobretudo, a possibilidade de um mundo finito e, no entanto, não limitado.

4.1 Princípio de Equivalência

O princípio de equivalência é de extrema importância para entender o princípio da Relatividade Geral, o qual diz que “todos os corpos de referência K , K' etc. são equivalentes para a descrição da natureza (ou para a formulação das leis gerais da natureza), qualquer que seja seu estado de movimento” (EINSTEIN, 1999, p.54). A interpretação de que as leis físicas são válidas em quaisquer referenciais, isto é, que um referencial não inercial é tão bom quanto um referencial inercial para descrever as leis da natureza se deu, em princípio, em decorrência da preocupação em compreender a igualdade entre massa inercial e massa gravitacional, como foi discutido no capítulo anterior. Esta igualdade chamava a atenção de Einstein, seja ela encontrada através da mecânica newtoniana ou por meio de experimentos, em particular os experimentos sobre o equilíbrio de torção, de Eötvös (EINSTEIN, 1984, p.64). Na mecânica newtoniana não havia nenhuma motivação física para que a massa gravitacional fosse igual à massa inercial, era apenas um resultado proveniente das equações estruturadas dentro desta teoria. “A igualdade entre as duas massas, gravitacional e inercial,

era acidental do ponto de vista da mecânica clássica e não desempenhava papel algum em sua estrutura” (EINSTEIN & INFELD, 2008, p. 180). No entanto, Einstein parecia convencido de que havia algo de mais profundo nesta igualdade, haveria de ter uma motivação física para tal. Esta convicção pode ter sido decisiva para a nova teoria da gravitação que, como já sabemos, daria uma interpretação física para a igualdade entre as massas inercial e gravitacional.

Segundo Einstein, a “inspiração” para interpretar os fenômenos gravitacionais surgiu através de um de seus famosos experimentos mentais, no qual um corpo em queda livre não sente o próprio peso.

Como já salientamos, uma das grandes motivações de Einstein era poder interpretar o resultado, já conhecido empiricamente, referente à igualdade entre massa gravitacional e massa inercial. Para interpretar tal resultado, Einstein constrói uma sequência de eventos envolvendo observadores em diferentes referenciais, com e sem aceleração constante. De acordo com nossa análise, defendemos que Einstein constrói cenários²⁵ possíveis onde uma história se desenvolve. De acordo com o que ocorre neste cenário construído, as entidades físicas envolvidas vão ganhando novos significados, coerentes com a visão da nova teoria que está sendo construída. Esta construção é tributária, de alguma maneira, ao que já era estabelecido, formando uma relação entre memória e imaginação, e que resulta na problematização de alguns canônicos, de acordo com a proposta de Bruner com relação à interpretação narrativa da realidade.

A elaboração de experimentos mentais a respeito do princípio de equivalência ocorre já no artigo do *Jarbuch*, em 1907, e é retomado no artigo de 1911, “sobre a influência da gravidade na propagação da luz”. Neste artigo (de 1911), Einstein constrói um cenário imaginando dois sistemas de referência, K e K', da seguinte maneira:

²⁵ De acordo com a conceituação de Gancho (1997), o cenário (ou “espaço”) tem como funções principais situar as ações das personagens e estabelecer com eles uma interação, quer influenciando suas atitudes, pensamentos ou emoções, quer sofrendo eventuais transformações provocadas pelas personagens. Como as personagens, o cenário (“espaço”) pode ser caracterizado mais detalhadamente em trechos descritivos, ou as referências espaciais podem estar diluídas na narração.

Imaginemos num campo de gravidade homogéneo (cuja aceleração designaremos por γ) um sistema de coordenadas em repouso K , de tal modo orientado que as linhas de força do campo fiquem dirigidas no sentido negativo do eixo z . Imaginemos também que num espaço isento de campos de gravidade se encontra um segundo sistema de coordenadas K' animado de um movimento uniformemente acelerado (de aceleração γ) na direcção do eixo do z e no seu sentido positivo. (EINSTEIN, 1911/1958, p.128)

Estes dois sistemas de referência são os lugares que compõe o cenário onde Einstein imagina algumas experiências ao decorrer da história. Já neste momento podemos notar que a confecção do cenário deste experimento mental é tributário de um pensamento matemático, uma vez que ele esta sendo formado usando sistemas de coordenadas cartesianos. Este cenário também é conceitual, uma vez que é construído a partir do uso de alguns conceitos físicos, particularmente o conceito de campo gravitacional que, como veremos, desempenha papel fundamental no desenvolvimento da história.

Einstein constrói este cenário tendo um problema em vista: será possível os observadores perceberem que tipo de movimento estão submetidos? ou seja, K' tem como desenvolver alguma experiência que o diga que está em um referencial uniformemente acelerado? No artigo fundador de 1916, Einstein imagina um cenário muito semelhante ao descrito acima, mas incluindo uma massa suficientemente afastada acelerando com relação a K' e com movimento uniforme com relação a K .

Seja K um referencial de Galileu [inercial], isto é, um sistema de referência tal que, em relação a ele (e pelo menos no domínio quadridimensional considerado), uma massa suficientemente afastada de outras massas se desloca em movimento rectilíneo e uniforme. Seja K' um segundo sistema de coordenadas que tem, em relação a K , um movimento de translação uniformemente acelerado. Teríamos então uma massa suficientemente afastada de outras massas animada de movimento acelerado relativamente a K' , sendo a sua aceleração, tanto em grandeza como em direcção, independente da sua composição material e do seu estado físico. (EINSTEIN, 1958/1916, p.145)

O ponto mais importante do desenvolvimento desta etapa da história, como adiantamos, está no seguinte questionamento: *Poderá um observador, em repouso relativamente a K' , inferir daqui que se encontra sobre um referencial 'realmente' acelerado?* (idem) Este é o problema central que surge a partir das experiências mentais relacionadas às massas distantes em cada um dos referenciais imaginados, isto é, será que existe alguma forma de os observadores inferirem seu estado de movimento através da observação da aceleração dessas massas? A importância deste questionamento para o desenrolar da história mostra a centralidade do problema na construção das narrativas, como proposto em um dos universais de Bruner.

Einstein entende que a resposta a este problema tem que ser negativa. O raciocínio que se segue é o ápice da narrativa, e traz uma nova interpretação para as massas inercial e gravitacional, que acabam se configurando como personagens nesta etapa da história.

Com efeito, o referido comportamento de massas que se movem livremente em relação a K' é susceptível de uma outra interpretação, igualmente boa, que é a seguinte: o referencial K' não está animado de movimento acelerado, mas existe um campo de gravidade no domínio espaço-temporal considerado, e é esse campo que origina o movimento acelerado dos corpos em relação a K' . (EINSTEIN, 1958/1916, p.145)

Para Einstein, o que torna possível esta interpretação do observador em K' é o fato de a experiência (isto é, verificarmos isto em fenômenos da natureza) nos ter ensinado que existe um campo de forças, o campo gravitacional, que possui a notável propriedade de comunicar a todos os corpos a mesma aceleração. Um indício desta igualdade era encontrado, por exemplo, nos experimentos de Eötvös, que Einstein cita em uma nota de rodapé de seu artigo de 1916. Com esta interpretação, Einstein entende que o “comportamento mecânico dos corpos em relação a K' é o mesmo que a experiência nos revela em relação a sistemas que estamos habituados a considerar como sistemas em ‘repouso’, ou seja, como sistemas ‘admissíveis” (EINSTEIN, 1958/1916, p.145). Com isto, o referencial K' passa a ser um sistema legítimo para descrever as leis da física, tanto quanto o

sistema de referência K (“inercial”), porque, em vez de um referencial com aceleração constante, ele pode ser considerado como um sistema em “repouso”, mas com a atuação de um campo gravitacional homogêneo. Isso implica que as massas consideradas até então como de naturezas diferentes, isto é, um tipo de massa dita inercial e outra gravitacional são, no fundo, duas faces da mesma moeda. O observador em K considera a massa distante como sendo inercial. No entanto, o observador em K' considera esta mesma massa como sendo gravitacional, pois ela está acelerada graças à ação de um campo de gravidade. Como ambos os sistemas são equivalentes, as massas também o são. Por isso, consideramos que essas massas são as personagens principais desta etapa da narrativa. Como apontou Gurgel (2010), o desenvolvimento da narrativa se configura não só de modo a caracterizar as personagens, mas também para compor as condições de sua entrada em cena. Ou seja, propor um cenário possível, neste caso estruturado por um pensamento matemático (sistemas cartesianos de referência, com e sem acelerações constantes/ com ou sem campo gravitacionais), e imaginar como essas personagens se comportam diante de diferentes situações, fez com que essas personagens ganhassem um novo significado: equivalência do ponto de vista físico, através de um contexto que permitiu que isto fosse evidenciado.

A partir de reflexões de Einstein sobre este capítulo do desenvolvimento da TRG, contidas em seu livro “Notas Autobiográficas”, defendemos que a caracterização das massas como personagens principais desta narrativa leva a considerações importantes do ponto de vista matemático, particularmente sobre a necessidade de uma nova maneira de encarar o significado métrico das coordenadas.

Começamos com um espaço vazio, sem campo, como é o caso – em relação ao sistema de inércia – na teoria da relatividade restrita, como a situação física mais simples que se pode imaginar. Se pensarmos agora em um sistema não-inerte introduzido no pressuposto de que o novo sistema é uniformemente acelerado contra o sistema da inércia (numa definição tridimensional) em uma direção (convenientemente definida), então existe, com referência a esse sistema, um campo gravitacional paralelo estático. O sistema de referência

pode ser rígido, euclidiano, nas suas propriedades métricas tridimensionais. Mas o tempo em que o campo aparece como estático não é medido por relógios estacionários igualmente constituídos. Com esse exemplo, reconhecemos que o significado métrico imediato das coordenadas desaparece quando se admitem as transformações não-lineares das coordenadas. Contudo, essa admissão é obrigatória, se quisermos fazer justiça à igualdade da massa gravitacional e da massa inerte. (EINSTEIN, 1982, p.67, negrito nosso)

O significado métrico das coordenadas é um dos canônicos que são questionados. Na TRE, o significado físico das coordenadas é direto, uma vez que o grupo de transformações neste contexto é o grupo de Lorentz, que são transformadas lineares. Este significado se perde quando se assume a possibilidade de transformações não-lineares que, como afirmou Einstein, faz-se necessário se quisermos levar a cabo o princípio de equivalência (PE). Como afirma Bruner, a construção de narrativas tende a violar alguns conhecimentos que tínhamos como certo, quebrando alguns canônicos.

No artigo de 1916, Einstein indica as decorrências do PE para o comportamento da luz. No artigo de 1911 os pensamentos envolvidos nisto ficam mais claros. Depois de chegar à equivalência entre os referenciais K e K' , de um ponto de vista da mecânica (acelerações de massas), Einstein se interessa nos desdobramentos desta equivalência para outros fenômenos físicos, uma vez que sua intenção é generalizar as leis da física, sejam leis da mecânica, do eletromagnetismo ou de qualquer outra teoria física. Einstein começa por discutir sobre a ponderabilidade da energia, considerando que a TRE não fornece nenhum argumento do qual se possa inferir que o peso de um corpo depende de seu conteúdo energético (como faz para a massa inerte). Propõe uma complementação do cenário apresentado inicialmente, inserindo dois sistemas materiais S_1 e S_2 , munidos de instrumentos de medida e que se encontram sobre o eixo z do referencial K , a uma distância h um do outro. Desta maneira o potencial gravitacional em S_2 é maior que em S_1 , por construção. Tendo este cenário em mente, Einstein imagina a seguinte experiência:

Imaginemos que S_2 emite para S_1 uma certa quantidade de energia E sob a forma de radiação. Admitamos ainda que as quantidades de energia são

medidas em S_1 e S_2 com dispositivos que se mostram completamente idênticos quando são levados a um mesmo local do sistema Z e aí comparados. (EINSTEIN, 1983/1911, p.131)

Até este momento, Einstein não faz nenhuma consideração a priori sobre o comportamento da radiação na presença de um campo gravitacional homogêneo. Considerações a este respeito são feitas partindo do princípio de equivalência.

De acordo, porém, com o nosso postulado da equivalência de K e K' , podemos estabelecer, em vez do sistema K colocado no campo de gravidade homogêneo, um sistema K' , que não está sujeito à gravidade, mas está animado de movimento uniformemente acelerado no sentido positivo do eixo z do sistema K . Os sistemas materiais S_1 e S_2 supor-se-ão rigidamente ligados ao eixo do z de K' . (idem)

Após esta consideração, Einstein adiciona mais um elemento ao cenário onde está se desenvolvendo a história: um terceiro sistema, S_0 , desprovido de aceleração, com relação a um referencial K_0 . O processo de transferência de energia de S_2 para S_1 será apreciado de S_0 , da seguinte maneira:

Admitamos que é nula a velocidade de K' em relação a K_0 no instante em que é emitida de S_2 para S_1 a energia de radiação E_2 . A radiação atingirá S_1 quando tiver decorrido o tempo h/c [h é a diferença de altura entre S_1 e S_2 e c é a velocidade da luz] (em primeira aproximação). Nesse instante, porém, S_1 possui, em relação a K_0 , a velocidade $\gamma h/c = v$ [γ é a aceleração de K' em relação ao referencial em “repouso” K_0] (ibdem)

A partir deste raciocínio, particularmente estruturado por um pensamento matemático, Einstein considera que a radiação que chega a S_1 não possui a energia E_2 com o qual foi emitida, mas sim uma energia maior. Este resultado foi obtido imaginando a situação em que a descrição física foi feita a partir de um referencial acelerado, K' . No entanto, utilizando o PE, Einstein considera que o resultado deve ser o mesmo se for considerado o sistema K , desprovido de aceleração mas dotado de um campo gravitacional. Assim, a energia com que a radiação chegará em S_2 dependerá da diferença de potencial gravitacional entre

S_1 e S_2 . Esta é uma nova característica da radiação, que surge nesta etapa da narrativa. Até então não havia nenhuma teoria que indicasse um “redshift” gravitacional. Portanto, a radiação pode ser entendida como uma personagem desta história, que teve uma característica importante evidenciada a partir de experiências mentais ocorridas em um cenário adequadamente contruído.

Os desdobramentos mais importantes desta etapa da narrativa ocorrem quando Einstein imagina as experiências mencionadas acima em termos de frequências, avaliadas com um relógio colocado em S_2 , que explicará o “redshift”.

[...] se um raio de luz for emitido em S_2 , sob um determinado potencial gravítico, e apresentar no instante da emissão a frequência ν_2 – determinada com um relógio colocado em S_2 – então ele apresentará, quando chegar a S_1 , uma outra frequência ν_1 – medida com um relógio idêntico ao anterior colocado em S_1 . (ibdem)

A partir deste resultado, Einstein propõe que seria possível fazer uma experiência para verificar se a frequência da luz depende, de fato, do campo gravitacional. Alguns físicos, de acordo com uma nota de rodapé do artigo de 1911, já haviam observado efetivamente desvios de riscas espectrais finas para o extremo vermelho do espectro, com uma grandeza da ordem daquela que foi calculada por Einstein, aproximadamente $2 \cdot 10^{-6}$.

Um problema que se coloca nesta altura da história é o seguinte: *como é que num processo permanente de transferência de luz de S_2 para S_1 pode chegar a S_1 um número de períodos por segundo diferente daquele que foi emitido em S_1 ?* (EINSTEIN, 1983/1911, p.136). O encaminhamento dado por Einstein foi indicar que não podemos considerar ν_2 e ν_1 como frequências tomadas de modo simplista como números de períodos por segundo. O ponto central é que nada nos força a admitir que os relógios em S_1 e S_2 , submetidos a diferentes potenciais gravitacionais, tenham de ser tomados com idênticos ritmos de funcionamento. Com isto, consideramos que os relógios são, neste momento, as personagens principais desta narrativa. A caracterização dos relógios como não tendo uma homogeneidade em sua medida de tempo, devido ao fato de suas medidas dependerem do potencial gravitacional, traz uma consequência importante. Esta

consequência é a quebra com um canônico extremamente importante para a TRE: a constância da velocidade da luz. Mais uma vez esta característica da interpretação narrativa da realidade, quebra da canonicidade, fica evidenciada nos textos de Einstein.

[...] para medir o tempo num local em que o potencial gravítico tenha o valor Φ relativamente a origem das coordenadas, deveremos utilizar um relógio que apresente – quando colocado naquela origem – um ritmo $(1 + \phi/c^2)$ vezes mais lento que o do relógio utilizado para medir o tempo na referida origem. Sendo assim, se designarmos por c_0 a velocidade da luz na origem das coordenadas, então a velocidade da luz, c , num local de potencial gravítico Φ será dada por

$$c = c_0 \left(1 + \frac{\phi}{c^2} \right) \text{ (EINSTEIN, 1983/1911, p.137)}$$

A conclusão de Einstein, portanto, é que o “princípio da constância da velocidade da luz não é, pois, segundo esta teoria [TRG], válido na forma que usualmente se põe na base da teoria habitual da relatividade [TRE]” (idem).

A partir disto, Einstein calcula o desvio que a luz deveria sofrer ao passar próximo ao sol. Ele chegou a um resultado de 0,83 segundo de arco. Como discutimos no capítulo 2, a possibilidade de fazer previsões é uma das importantes características da relação entre matemática e física. Einstein conclui seu artigo propondo aos astrônomos o desafio de observar suas previsões, embora, como sabemos hoje, esta previsão estivesse errada por um fator 2, que só foi corrigida na versão final da TRG em 1915.

Seria de extrema conveniência que os astrônomos se ocupassem da questão que aqui fica esboçada, ainda que ela se apresente insuficientemente fundamentada com os raciocínios anteriores, ou até inteiramente aventurosa. Porque, independentemente de qualquer teoria, levanta-se a questão de saber se os meios de que actualmente se dispõe são capazes de registrar uma influência dos campos de gravidade sobre a propagação da luz. (EINSTEIN, 1983/1911, p. 139)

A partir desta análise, entendemos que o pensamento narrativo foi essencial para a elaboração destes experimentos mentais, em particular, quando foram criados cenários em que seriam desenvolvidas as experiências. Os

desenvolvimentos destas experiências foram, em diferentes eventos, caracterizando diferentes personagens: massas inercial e gravitacional (equivalência), radiação, relógios (suas medidas dependentes do campo gravitacional) e velocidade da luz (que não é mais tida como absolutamente constante, como na TRE). Vemos nesta sequência uma estrutura de tempo consignada, que não depende da marcação de tempo no sentido cronológico, mas do desenvolvimento de eventos encadeados, o tempo da narrativa. Primeiro, Einstein imaginou um cenário. Em seguida, imaginou como os observadores em K e K' poderiam dizer algo sobre seu estado de movimento, particularmente através da observação de massas aceleradas. Em uma outra etapa, Einstein imagina experiências com luz (radiação), que evidenciou algumas características importantes, como o “redshift” gravitacional, a influência do campo gravitacional no funcionamento de relógios e a velocidade da luz dependente do potencial gravitacional. Em todas essas experiências, em todas as etapas da narrativa, o campo gravitacional apresentou-se como o elemento principal do cenário, permitindo que muitas dessas características que mencionamos pudessem ser evidenciadas. Neste sentido que não apenas as personagens são importantes na construção de uma história, mas, sobretudo, as condições de sua entrada em cena, como defendeu Gurgel (2010).

O pensamento matemático esteve presente na estruturação destas experiências mentais, particularmente através da noção de referencial cartesiano, mas também com a confecção de equações que possibilitaram quantificar, por exemplo, a influência da gravidade sobre o ritmo dos relógios e a curvatura da luz passando rasante ao sol. Notamos, portanto, que estes dois modos de pensamentos, narrativo e matemático, apresentaram-se neste contexto de maneira complementar, compondo os experimentos mentais acerca do princípio de equivalência. Isto é, tanto um quanto o outro foram indispensáveis para que os conceitos envolvidos pudessem ganhar uma nova significação física, de acordo com a teoria que está sendo construída.

Versões didáticas destas experiências de pensamento se tornaram recorrentes no ensino da TRG. Essas experiências são conhecidas na literatura

como “experimentos do elevador”. O próprio Einstein constrói uma narrativa em seu livro publicado em 1916 que se configura como uma versão menos técnica de sua narrativa anterior, sobretudo relacionado à sua primeira etapa, na qual as massas inercial e gravitacional são significadas. Neste livro, Einstein constrói o cenário de uma maneira semelhante, mas agora propõe que imaginemos uma grande caixa como corpo de referência (daí surgem as experiências no “elevador”).

*Imaginemos uma vasta porção de espaço vazio, tão afastada das estrelas e de outras massas significativas que, com suficiente exatidão, nos encontremos diante do caso previsto pelo princípio fundamental de Galileu. Então é possível, para essa parte do mundo, escolher um corpo de referência galileano relativamente ao qual os pontos em repouso permanecem em repouso e os pontos em movimento permanecem em movimento retilíneo uniforme. **Como corpo de referência imaginemos uma ampla caixa com forma de um aposento:** dentro dela, suponhamos que se encontre um observador provido de aparelhos. (EINSTEIN, 1999, p.58, ênfase nossa)*

Einstein continua contextualizando o cenário e diz o seguinte:

[...] para este observador [em K, dentro da caixa], evidentemente, não existe gravidade (peso). Ele terá que se prender ao chão com fios se não quiser que, com o mais leve golpe contra o chão, seu corpo saia flutuando lentamente em direção ao teto do aposento. (idem)

Esta consideração é razoável e não depende de nenhuma nova significação física, ou seja, ele está partindo de conhecimentos que já estão culturalmente bem estabelecidos. Na sequência disto, Einstein começa a imaginar as primeiras experiências que ocorrerão neste cenário.

Suponhamos que, bem no centro do teto da caixa, esteja afixado um gancho com uma corda, e que um ser cuja natureza não interessa esteja puxando a corda com uma força constante. Então a caixa, juntamente com o observador, começará a mover-se para “cima” em um movimento uniformemente acelerado (ibdem).

A questão que surge nesta etapa da história é a seguinte: *como o homem dentro da caixa considera o que está acontecendo?* (EINSTEIN, 1999/1916, p. 59).

Einstein imagina que o homem dentro da caixa fará um experimento simples para verificar seu estado de movimento: deixará um objeto cair.

*Se ele [o observador em K', dentro da caixa] soltar um corpo que antes estava segurando com a mão, a aceleração da caixa deixa de ser transmitida a este corpo; por isso o corpo irá se aproximando do piso da caixa. O observador, além do mais, há de se convencer **que a aceleração do corpo em direção ao piso é sempre a mesma, qualquer que seja o corpo com que ele realize a experiência** (EINSTEIN, 1999/1916, p.59, ênfase do autor)*

Com isto o observador dentro da caixa chegará à conclusão “de que, junto com a caixa, ele se encontra em um campo gravitacional que é constante no tempo” (EINSTEIN, 1999/1916, p.59). Ou seja, o observador em K' não conclui que está em um referencial acelerado, mas em um referencial “parado” sob a ação de um campo de gravidade. O importante é que não há nenhuma experiência que indique a ele o contrário. Nesta etapa surge a ideia de equivalência entre os referenciais inerciais e não inerciais, particularmente graças ao campo gravitacional, que é o elemento mais importante do cenário.

Temos, portanto, uma boa razão para estender o princípio de relatividade a corpos de referência acelerados uns em relação aos outros, e ganhamos assim um poderoso argumento em favor de um postulado da relatividade geral. (ibidem, p.59)

Em uma etapa subsequente da narrativa, Einstein imagina outras experiências feitas dentro da caixa e interpretada pelos observadores em K e em K'.

Suponhamos que o homem na caixa prenda na face interna do teto da caixa uma corda, e que na extremidade livre desta ele amarre um corpo. Por influência deste, a corda ficará tensa e pendurada “verticalmente”. (ibidem, p.59)

A questão central que surge com esta construção é a seguinte: Qual a causa da tensão da corda? Cada um dos observadores, em K e em K', tecerá uma resposta.

*O homem na caixa dirá: “O corpo suspenso experimenta no campo gravitacional uma força para baixo, que é equilibrada pela tensão da corda: **o que determina o valor da tensão da corda é a massa gravitacional do corpo suspenso**”. Mas, por outro lado, um observador que flutue livremente no espaço há de considerar a situação da seguinte maneira: “A corda é forçada a acompanhar o movimento acelerado da caixa e transmite este movimento ao corpo preso a ela. A tensão na corda tem justamente o valor necessário para produzir a aceleração deste último. **O que determina o valor da tensão na corda é a massa inercial do corpo** (ibdem, p.59, ênfase nossa)*

Com isto, Einstein chega a grande conclusão destas construções:

*Vemos, por este exemplo, que nossa extensão do princípio de relatividade faz parecer como **necessária** a afirmação da igualdade entre a massa inercial e a massa gravitacional. Com isto obtivemos uma interpretação física desta proposição. (ibdem, p.60, ênfase do autor)*

Ou seja, a partir das construções que dirigiram Einstein à conclusão de que os sistemas de referência são equivalentes, independentemente de seu estado de movimento (acelerado ou não), surge uma explicação física para a igualdade entre as massas inercial e gravitacional, resultado que era empiricamente conhecido, mas que não se sabia sobre os fundamentos de tal fato. Assim, essas personagens ganharam uma nova significação física, a saber, de que são duas faces de uma mesma moeda, são equivalentes do ponto de vista físico.

A elaboração do princípio de equivalência foi de suma importância para a continuidade da construção da TRG e é essencial para a compreensão de outros experimentos mentais que surgiram ao longo do desenvolvimento da TRG. Analisaremos na próxima seção um desses experimentos mentais, considerados por Stachel (2002/1980) como um “elo perdido” na história da TRG. Trata-se do experimento mental do disco rígido em rotação, que foi fundamental para que Einstein abandonasse a geometria euclidiana e considerasse a curvatura do espaço. De fato, o artigo de 1911 foi o último em que Einstein considerou apenas o tempo como curvado, mas o espaço não (PAIS, 1993, p.201). Ou seja, o artigo de 1911 mencionava o efeito de um campo de gravitação sobre o funcionamento de relógios, mas não menciona nenhum efeito sobre o espaço (ou medidas de réguas).

4.2 Distorção do Espaço-Tempo

Uma consequência importante dos trabalhos acerca da TRG é uma nova interpretação da geometria do espaço-tempo, isto implica que “nesse novo universo, não há espaço e tempo absolutos, e a gravidade não é uma força – não é um puxão entre dois objetos -, mas uma propriedade do espaço e do tempo” (CREASE, 2011, p.175). Encontramos, nos textos analisados, construções que culminaram em problemas formais, principalmente com relação à geometria. Em particular, destacaremos experimentos mentais, cujos resultados implicaram na insuficiência da geometria euclidiana em lidar com os novos problemas físicos apresentados pela TRG.

4.2.1 Problema do disco de Einstein

Os experimentos mentais discutidos na seção anterior estão no coração do que Stachel (2002) chamou de Ato I do desenvolvimento da TRG, que resultou na formulação da ideia básica da TRG: princípio de equivalência. A principal motivação de Einstein era estender a validade do princípio de relatividade, que na TRE restringia-se aos referenciais inerciais, para quaisquer sistemas de referência. Como vimos na seção anterior, a gravitação foi a “ponte” que permitiu relacionar referenciais inerciais e referenciais com acelerações constantes.

Neste contexto de extensão do princípio de relatividade havia um tipo de referencial particularmente importante a ser considerado: os referenciais em rotação. Julian Barbour (1992, p.130, tradução nossa) aponta que “se Einstein quisesse fazer algum progresso em sua empreitada para estender o princípio de relatividade [...], era claramente necessário para ele estender o argumento que usou em 1907, de aceleração retilínea uniforme, para rotação”. A primeira evidência que se conhece sobre a necessidade e importância de tratar os referenciais em rotação na TRG, como já apontado no capítulo 3, encontra-se em uma carta de Einstein à Sommerfeld, datada de 29 de Setembro de 1909, onde Einstein faz uma breve menção ao experimento mental do disco rígido em rotação.

O experimento mental do disco foi decisivo em dirigir a atenção de Einstein para as geometrias não-euclidianas e, assim, permitindo-lhe interpretar os fenômenos de gravidade como distorções do espaço-tempo. Como vimos na seção anterior, Einstein já considerava, no artigo de 1911, que o comportamento de relógios eram influenciados pela gravidade. O experimento mental do disco em rotação evidencia que, além dos comportamentos de relógios, a gravidade também influencia as medidas de réguas. Portanto, com estas construções surge um importante problema que envolve, particularmente, o pensamento matemático: as coordenadas espaço-temporais, no contexto da TRG, passam a não ter um significado físico direto como na física clássica e na TRE. Nossa análise indicou que, novamente, Einstein se valeu dos pensamentos narrativo e matemático para construir suas experiências mentais. O pensamento narrativo age, sobretudo, como uma maneira de criar cenários possíveis onde as experiências se desenvolverão, destacando a importância de preparar as condições de entrada em cena das personagens. Cada etapa das experiências mentais corresponde a eventos da narrativa em que as personagens vão ganhando novos significados, coerentes com a teoria que está sendo construída. Consideramos também que, das experiências mentais que analisamos, esta é a que apresenta um tipo de pensamento matemático mais profundo. Isto porque o pensamento físico neste contexto foi arrastado pelas formas matemáticas (PATY, 2005), uma vez que as geometrias não-euclidianas permitiram Einstein interpretar os fenômenos de gravidade como sendo distorções no espaço-tempo, revelando o caráter geométrico da TRG.

O experimento mental do disco foi citado por Einstein em um artigo de 1912 (EINSTEIN 1996/1912, p.96). Analisaremos, no entanto, este experimento a partir do artigo fundador de 1916. Einstein começa por criar um cenário, da maneira que se segue.

Num espaço livre de campos de gravidade introduzamos um sistema de referência de Galileu $K(x, y, z, t)$ e, além disso, um sistema de coordenadas $K'(x', y', z', t')$ em movimento de rotação uniforme. Supõe-se em coincidência permanente as origens dos dois sistemas, assim como os seus eixos Z . (EINSTEIN, 1983/1916, p.147)

O cenário que Einstein cria, portanto, é composto principalmente por dois referenciais, com destaque para o referencial acelerado, em rotação (na abordagem do artigo fundador, Einstein trata o referencial K' apenas como um sistema em rotação, não o trata como um disco rodando). Na sequência disto, Einstein imagina mais uma coisa para compor este cenário: uma circunferência desenhada no plano $X-Y$ de K . Considera que, por razões de simetria, a circunferência traçada em K também pode ser considerada uma circunferência no plano $X'-Y'$ de K' (lembrando que a origem de ambos os referenciais coincidem permanentemente). Após criar este cenário, Einstein imagina a primeira experiência: medir o perímetro e o diâmetro da circunferência centrada em K e K' .

Suponhamos agora que se mede o perímetro e o diâmetro desta circunferência com uma régua-unidade (infinitamente pequena em relação ao raio) e que se calcula o quociente dos resultados das medições. (EINSTEIN, 1983/1916, p.147)

Essas medidas trarão, do ponto de vista matemático, um grande resultado para a TRG. Se a medida for feita com a régua que está em repouso com relação a K , a razão entre perímetro e diâmetro será π . Contudo, se a medida for efetuada com a régua em repouso com relação a K' , então, a razão obtida será maior que π .

Reconhece-se isto facilmente quando se aprecia todo o processo de medição partindo do sistema “em repouso” K , e se tem em conta que a régua disposta ao longo da circunferência sofre a contração de Lorentz, ao passo que uma régua disposta ao longo do raio não a sofre. (EINSTEIN, 1983/1916, p.148)

Este é o ponto alto da narrativa e diz respeito ao comportamento das régua sobre um referencial em rotação. Vale ressaltar que Einstein parte de um de algo que estava, neste momento, bem consolidado na comunidade científica: a contração de Lorentz. Como afirma Bruner (2001/1996), a construção da narrativa se dá em uma espécie de dialética entre imaginação e memória. Ainda que Einstein esteja criando algo novo, ele não faz isto a partir do zero, mas de algo que já tem alguma validade (mesmo que esta validade seja colocada em xeque ao longo da história).

Em uma correspondência trocada com Petzoldt, um filósofo positivista quem escreveu a Einstein objetando o tratamento dado ao disco rígido em rotação, Einstein esclarece o porque a razão entre o perímetro e o diâmetro da circunferência deveria ser maior que π .

Vamos imaginar, para deixar claro para nós mesmos, uma foto tirada de K_0 [referencial em “repouso”, equivalente ao que Einstein chamou de K no artigo de 1916]. Nesta foto a medida radial da régua tem um comprimento 1, contudo, a medida na tangente tem um comprimento $\sqrt{1-(v/c)^2}$. A circunferência do disco circular não é nada além do que o número de réguas-unidade tangenciais que estão presentes na foto ao longo da circunferência, cujo comprimento considerado a partir de K_0 é U_0 . Então, $U = U_0 / \sqrt{1-(v^2/c^2)}$ (EINSTEIN apud STACHEL, 2002/1980, p. 250)

Como não há contração de Lorentz na direção radial, podemos considerar que os raios são medidos igualmente pelos dois referenciais, isto é: $r = r_0$. Para o referencial “em repouso”, podemos considerar, de acordo com a geometria euclidiana, que o comprimento da circunferência é: $U_0 = 2\pi r_0$. Como Einstein estava interessado em encontrar a razão entre o comprimento da circunferência e o raio no referencial em rotação, basta dividir os dois lados da equação descrita na citação acima pelos raios medidos em cada referencial. Este raciocínio foi exatamente o empreendido por Einstein na correspondência com Petzoldt.

Então, [...], $U/r = U_0/r_0 \left(1/\sqrt{1-(v^2/c^2)}\right)$, ou levando em conta (1)

$$[U_0 = 2\pi r_0] = 2\pi / \sqrt{1-(v^2/c^2)}. \text{ (idem)}$$

Ou seja, a razão entre a circunferência do disco e seu raio é: $U/r = \gamma 2\pi$. Como γ é sempre maior que 1, então, esta razão será maior que 2π (considerando o diâmetro e não o raio, a razão será sempre maior que π). Este resultado coloca imediatamente a validade da geometria euclidiana em risco, quando se considera referenciais não inerciais, como é o caso do disco em rotação. Concluindo a experiência mental de medir o perímetro e o diâmetro das circunferências no referencial em rotação, Einstein afirma:

Sendo assim [a razão sendo maior que 2π], a geometria euclidiana não é válida no sistema K' [referencial em rotação]; e o conceito de coordenada acima definido, visto que pressupõe a validade daquela geometria, também não é aplicável ao sistema K' . (EINSTEIN, 1983/1916, p. 148)

Vale notar que, graças ao princípio de equivalência, o observador em K' pode concluir que está em um referencial em repouso mas com a atuação de um campo gravitacional. Assim, a geometria euclidiana não é válida para referenciais em que atuam campos de gravidade. Com isso, passa a ser necessário descobrir a métrica de um ponto do espaço-tempo para que seja possível escrever as coordenadas neste ponto, pois com a presença de massa e energia o espaço-tempo já não é mais plano, portanto, não vale mais a métrica simples de Minkowski.

Na sequência, Einstein imagina experiências feitas com relógios.

[...] imaginemos dois relógios idênticos, um na origem das coordenadas, outro sobre a circunferência, sendo observados a partir do sistema “em repouso” K . De acordo com um conhecido resultado da teoria da relatividade especial, o relógio colocado sobre a circunferência apresenta – quando observado de K – um ritmo de funcionamento mais lento que o relógio colocado na origem, visto que aquele está animado de movimento e este não. Um observador situado na origem comum das coordenadas que fosse capaz de observar, por meio da luz, o relógio situado sobre a circunferência, verificaria portanto que este relógio se atrasa em relação ao relógio que tem junto de si. E, recusando-se a admitir que a velocidade da luz, no percurso em questão, dependa explicitamente do tempo, ele interpretará a sua observação dando-lhe o significado de que o relógio colocado sobre a circunferência tem “realmente” um ritmo mais lento que o relógio colocado na origem. (EINSTEIN, 1983/1916, p.148)

Com esta construção, considerando que o tempo é a personagem principal desta etapa da história, Einstein chega à mesma significação de tempo da que mencionamos na seção anterior. Ou seja, esta construção também caracterizou a personagem tempo como dependente do lugar onde se encontra, isto é, do potencial gravitacional.

Deste modo não lhe será possível [ao observador na origem comum dos referenciais] evitar uma definição de tempo que inclua o facto de o ritmo de um relógio depender do lugar em que se encontra. (EINSTEIN, 1983/1916, p.149)

Com estes experimentos mentais ocorridos no cenário imaginado por Einstein, disco em rotação, foi possível reconhecer alguns pontos importantes para o desenvolvimento da TRG, particularmente relacionados à problemas matemáticos: dificuldade em estabelecer as coordenadas espaço-temporais. Novamente, portanto, consideramos que os pensamentos narrativo e matemático foram complementares no contexto de experimentos mentais de Einstein. Com esses experimentos mentais, em que a história se desenvolveu de forma que as personagens “régua” e “relógios” fossem caracterizadas, Einstein concluiu o seguinte:

Chegamos assim a esta conclusão: na teoria da relatividade geral não é possível dar às grandezas espaço e tempo definições que permitam a medição direta de diferenças de coordenadas espaciais por meio de uma régua-unidade e a de intervalos de tempo por meio de um relógio-padrão.

Assim, o processo até agora utilizado para estabelecer coordenadas, de uma maneira determinada, no contínuo espaço-temporal, torna-se impraticável, e não parece haver nenhum outro caminho que permita encontrar sistemas de coordenadas de tal forma adequados ao universo quadridimensional que da sua aplicação se pudesse esperar para as leis da natureza uma formulação particularmente simples. Nada mais resta, por conseguinte, que considerar como equivalente em princípio para a descrição da natureza todos os sistemas de coordenadas que se possam imaginar. (EINSTEIN, 1983/1916, p. 149)

Com isto, fica claro para Einstein a exigência de covariância geral para as equações da TRG, isto é, as leis da natureza deveriam ser descritas por equações que tenham validade em todos os sistemas de coordenadas, sendo covariantes em relação a toda e qualquer substituição. Satisfazer esta exigência de covariância geral implica satisfazer, também, o postulado da relatividade geral “porque em *todas* as substituições estão sempre necessariamente incluídas aquelas que correspondem a todos os movimentos relativos dos sistemas de coordenadas” (EINSTEIN, 1983/1916, p. 149).

O problema de se definirem as coordenadas espaço-temporais teve centralidade na construção da história que analisamos, em que experimentos mentais foram feitos em um cenário construído: referencial em rotação. A centralidade do problema é uma importante característica das narrativas, configurando-se como um dos universais da interpretação narrativa da realidade proposto por Bruner (2001/1996). Mais uma vez a construção dessas histórias mostrou uma relação dialética entre memória e imaginação, permitindo que uma nova interpretação da natureza surgisse. Einstein valeu-se dos resultados da TRE, em especial a contração de Lorentz na direção do movimento e a dilatação temporal, para lidar com situações novas, do ponto de vista da validade da relatividade, ou seja, em referenciais não-inerciais. Isto resultou na problematização de um importante canônico: a geometria euclidiana. Esta característica também versa com um dos universais de Bruner, a canonicidade implícita (BRUNER, 2001/1996). As construções realizadas a partir de experimentos mentais permitiram Einstein concluir que seria necessário buscar novas geometrias para garantir a exigência de covariância geral, ou, em outras palavras, para estender o princípio de relatividade. Portanto, notamos que os pensamentos narrativo e matemático se apresentaram, novamente, de maneira complementar.

Como se sabe, as ideias propostas na TRG tiveram grande repercussão na cosmologia. Na subseção a seguir analisamos mais experimentos mentais de Einstein em que o pensamento narrativo e matemático são apresentados de maneira complementar. O pensamento narrativo surge, novamente, como forma de criar um cenário possível onde uma história se desenvolve de maneira que os personagens principais possam ser caracterizados de acordo com a teoria que está surgindo.

4.3 Cosmologia einsteiniana

Mencionamos alguns experimentos mentais no contexto da TRG para discutirmos o papel dos pensamentos narrativo e matemático na gestação de novas ideias. Notamos que estes pensamentos se apresentaram de maneira

complementar no contexto estudado. Apresentaremos nesta subseção mais experimentos mentais de Einstein, contudo, voltados agora à considerações cosmológicas que derivam de sua TRG.

Einstein formulou algumas explicações acerca da estrutura do nosso universo. A construção que destacaremos, em particular, trata da possibilidade de um mundo finito e, no entanto, não limitado. Einstein destaca as visões de Riemann, Helmholtz e Poincaré, que consideram que com o desenvolvimento das geometrias não euclidianas passa a ser possível colocar em dúvida a infinitude do nosso espaço sem que entremos em conflito com a experiência (EINSTEIN, 1999, p. 88). Para estruturar sua ideia, Einstein constrói uma história em um cenário bastante inusitado: um mundo de seres bidimensionais. A ideia de desenvolver a história em um cenário como este é a tentativa de superar nossas dificuldades em imaginar um mundo quadridimensional. Lembremos que, de acordo com Bruner (2001/1996) as narrativas têm um compromisso, apenas, com a verossimilhança. Assim, o cenário criado não precisa ser, necessariamente, real. Einstein cria o cenário da seguinte maneira:

Começemos imaginando um mundo bidimensional. Suponhamos que criaturas achatadas, com instrumentos achatados, sobretudo com bastõezinhos rígidos igualmente achatados, possam se movimentar livremente em um plano. Admitamos que fora deste plano não exista para esses seres coisa alguma, mas que o mundo que eles observam em si próprios e em suas coisas achatadas seja um mundo fechado do ponto de vista causal (EINSTEIN, 1999, p.89).

Nesta etapa da história Einstein coloca a exigência de que seja possível que esses seres bidimensionais possam realizar, com seus bastõezinhos, construções da geometria plana euclidiana. Para isso, imagina experiências mentais em um novo cenário, composto basicamente por uma mesa plana contínua. A construção deste cenário começa da maneira que se segue:

Tenho à minha frente a superfície de uma mesa de mármore. De um ponto qualquer da mesa posso chegar a outro ponto qualquer, passando sempre um (grande) número de vezes para um ponto “vizinho”, ou – com outras palavras –

indo de um ponto a outro sem dar “saltos” [...] Expressamos isto dizendo que a superfície é um contínuo (EINSTEIN, 1999/1916, p.70)

Após esta construção do cenário, Einstein imagina algumas experiências feitas com os bastõezinhos. Eles são, nesta etapa da história, personagens, uma vez que as ações que eles têm dentro da história trarão novas significações das coordenadas espaciais, particularmente através de um pensamento de tipo matemático.

Imaginemos agora que dispomos de um grande número de pequeninos bastões, pequenos em relação às dimensões da mesa, e todos de igual comprimento. Entendemos com a última afirmação que é possível fazer com que as extremidades de dois quaisquer destes bastões coincidam. Coloquemos agora quatro destes bastõezinhos sobre a placa da mesa, de modo que suas extremidades formem um quadrilátero cujas diagonais tenham iguais comprimentos (um quadrado) (idem, p.71)

Na sequência, Einstein imagina que coloquemos ao lado deste quadrado outros quadrados idênticos, de modo que:

Por fim, toda a mesa estará coberta com quadrados, de tal forma que, no interior do desenho, cada lado de um quadrado pertence a dois quadrados e cada vértice de um quadrado pertence a quatro quadrados (ibdem, p.71).

A imagem a seguir esquematiza o que foi proposto nesta etapa da história.

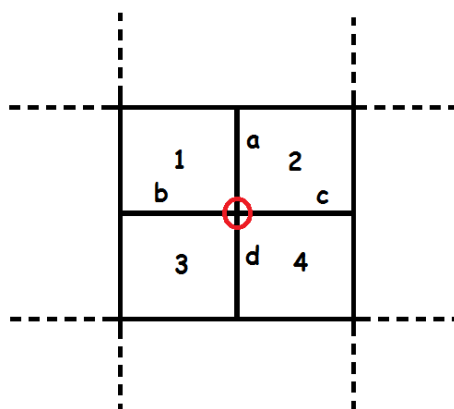


Figura 2 - O vértice, circulado no centro da figura, pertence aos quadrados 1, 2, 3 e 4. A semi reta a , pertence aos quadrados 1 e 2, a semi reta b , pertence aos quadrados 1 e 3 e assim por diante. (Fonte: Imagem produzida pelo autor desta dissertação)

Esta construção com os bastõezinhos permite criarmos uma espécie de “malha” que serve como coordenadas cartesianas.

Se eu escolher o vértice de um quadrado como “origem” (ponto inicial), poderei caracterizar qualquer outro vértice de um quadrado em relação à origem por meio de dois números. Basta indicar quantos bastõezinhos devo andar para a “direita” e quantos devo andar em seguida para “cima” a fim de chegar ao vértice considerado. Estes dois números serão então as “coordenadas cartesianas” deste último vértice em relação ao “sistema cartesiano de coordenadas” determinado pelos bastõezinhos. (EINSTEIN, 1999/1916, p. 71)

Esta consideração só é possível se a superfície for perfeitamente plana, de modo que todos os quadrados se encaixem perfeitamente. Ou seja, este sistema de coordenadas só é válido em um contínuo euclidiano. A etapa subsequente da história problematiza exatamente o contínuo euclidiano. Para construir o problema, Einstein imagina um novo elemento no cenário: um gradiente de temperatura na superfície (na mesa).

Pela seguinte modificação da nossa experiência mental podemos constatar que também deve haver casos em que a experiência não dá certo [formar a malha com os bastõezinhos]. Suponhamos que os bastõezinhos possam se “dilatam” com a temperatura e que a superfície da mesa seja aquecida no meio mas não nas bordas. Dois de nossos bastõezinhos ainda podem ser levados a coincidirem em qualquer lugar da mesa, mas nossa construção de quadrados de necessariamente se desorganizar, porque os bastões da parte interna da superfície da mesa se dilatam, mas não os da parte externa (idem, p.72)

Com a construção desta narrativa, a partir de analogias com dilatações térmicas dos bastõezinhos, que representam, em última instância, as distorções do espaço na TRG, Einstein conclui o seguinte:

Com relação aos nossos bastõezinhos – definidos como unidade de medida – a superfície da mesa não é mais um contínuo euclidiano, e nós não temos mais condições de, com sua ajuda, definir diretamente coordenadas cartesianas [...] então o método das coordenadas cartesianas tem que ser abandonado e substituído por um outro que não exija a validade da geometria euclidiana para corpos rígidos (EINSTEIN, 1999, p.73).

A partir de uma narrativa diferente, baseado em uma construção analógica, Einstein chega ao mesmo problema da significação física das coordenadas e a validade da geometria euclidiana. Essas construções são necessárias na narrativa que diz respeito à interpretação cosmológica de Einstein, na qual defende que pode haver um mundo infinito, mas ilimitado.

No desenvolvimento da narrativa sobre a cosmologia, Einstein diz que é possível que os “seres achatados” cheguem à conclusão de que seu mundo é plano, desde que com seus bastõezinhos seja possível executar as construções da geometria euclidiana do plano, cada bastãozinho, independente de sua posição, representando sempre o mesmo comprimento, como na primeira etapa das experiências mentais com os bastõeszinhos sobre a mesa que discutimos anteriormente.

Einstein continua sua narrativa imaginando que esses seres estão não mais sobre um plano, mas sobre a superfície de uma esfera. Com isto surge a seguinte questão: *Será que esses seres podem considerar a geometria de seu mundo como uma geometria euclidiana bidimensional e seus bastõezinhos como a realização do “segmento de reta”?* A resposta é não, pois quando tentam realizar uma reta eles obtêm uma curva que nós denominamos de grande círculo, isto é, “uma linha fechada em si mesma, com um determinado comprimento finito que pode ser medido com um bastãozinho” (EINSTEIN, 1999, p.89). Para Einstein “o grande atrativo com que nos deparamos ao aprofundar esta reflexão consiste em reconhecer o fato de que o mundo destes seres é finito, e no entanto não tem limites” (EINSTEIN, 1999, p. 90). Os seres bidimensionais poderiam, através de experiências e sem a necessidade de fazer uma viagem espacial, perceber que não moram em um mundo euclidiano. Este resultado seria obtido de maneira análoga ao “problema do disco de Einstein”, através da seguinte experiência:

De um ponto, eles traçam para todas as direções “segmentos de retas” (arcos de círculos, quando consideramos tridimensionalmente) de igual comprimento. A linha que une as extremidades livres desses segmentos é por eles denominada “circunferência”. Na geometria euclidiana, a razão do perímetro dessa circunferência, medida com um bastãozinho, para o seu diâmetro, medido com o

mesmo bastãozinho, é igual a mesma constante π , que independe do diâmetro do círculo. Sobre sua superfície esférica, nossos seres hão de encontrar que esta

razão é igual a $\pi \frac{\text{sen} \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}}$, isto é, um valor que é menor do que π e tanto menor

que π quanto maior for o raio da circunferência comparada ao raio R do “mundo esférico” (EINSTEIN, 1999, p.90).

Com esta construção, Einstein faz algumas considerações, principalmente no que se refere à possibilidade de imaginarmos espaços fechados que não possuem limites. Com isto, lança aos astrônomos e físicos “a interessantíssima questão de saber se o Universo em que vivemos é infinito ou, à maneira do mundo esférico, finito” (EINSTEIN, 1999, p.92).

A construção dessas experiências mentais foram, a nosso ver, mais especulativas do que as que apresentamos anteriormente. Talvez Einstein não as apresentasse em contextos mais formais, como artigos acadêmicos, como foi o caso das experiências do “elevador” e a do disco em rotação. De todo modo, defendemos que essas construções permitem a Einstein construir uma visão particular sobre a natureza. A especulação, a imaginação, permite-lhe uma interpretação da natureza. Embora essas experiências mentais tenham sido diferente das demais que estudamos, principalmente por apresentar menos aspectos formais do que as antecedentes, ainda assim percebemos que os pensamentos narrativo e matemático se apresentaram de maneira complementar na confecção das experiências mentais. O pensamento narrativo, sobretudo, permitiu a Einstein criar cenários em que foram desenvolvidas as experiências. Vale notar que tão importante quanto as personagens que agem ao longo da história, é a criação das condições de entrada em cena dessas personagens.

Capítulo 5

Considerações Finais

A partir da investigação que fizemos da gestação da TRG, focando particularmente na construção de alguns experimentos mentais, consideramos que, embora o pensamento matemático tenha uma identificação muito grande com o desenvolvimento do conhecimento físico, principalmente no contexto da física moderna, em particular da TRG, o pensamento narrativo também desempenhou um papel importante na estruturação do pensamento de Einstein. Defendemos que a principal contribuição do pensamento narrativo foi trazer a possibilidade de criar cenários onde se desenvolveram os experimentos mentais, cujas caracterizações das personagens principais das histórias construídas resultaram em novas significações de entidades físicas. O pensamento narrativo permitiu, em certa medida, a criação de realidades significantes. Ou seja, ao longo das narrativas as personagens ganhavam novos significados físicos coerentes com a teoria que estava surgindo. Essas caracterizações/significações, ocorrida dentro da narrativa, ganharam uma espécie de “direito à realidade”, passando a compor nossas interpretações acerca do mundo físico. Notamos que tão importante quanto as personagens da narrativa, é a elaboração das condições de sua entrada em cena, ou seja, o cenário criado teve papel central para que as personagens, entidades físicas, fossem caracterizadas. A atuação do campo gravitacional nos diferentes contextos estudados foi a peça principal dos cenários.

Foi clara a importância do pensamento matemático na estruturação dos experimentos mentais analisados, particularmente nos experimentos do disco em rotação. Com isto, concluímos que os dois modos de pensar analisados, narrativo e matemático, embora bastante distintos, são complementares no contexto da gestação da TRG. Portanto, concluímos que pensamentos que não são estritamente formais, como é o caso do pensamento narrativo, também

desempenham papel importante na atividade do físico, pelo menos foi este o caso dos experimentos mentais analisados.

A identificação destes dois modos de pensamento na física tem particular relevância para o seu ensino. Com relação ao pensamento matemático, concluímos, em concordância com o que vem sendo defendido na literatura, que deve ser dada especial atenção para que não ensinemos a física de maneira apenas técnica, passando uma imagem aos estudantes de que a matemática serve somente como uma boa ferramenta para resolver os problemas de física, uma ferramenta apenas que articula seus conceitos. O poder que a matemática exerce no pensamento do físico está relacionado, principalmente, a seu papel estruturante e não ao seu papel meramente descritivo (PIETROCOLA, 2002), ou seja, a matemática é constitutiva dos conceitos físicos (PATY, 1995). Entendemos que considerar a relevância do pensamento narrativo, por sua vez, traz à luz a dimensão criativa do cientista em seu desafio de interpretar os fenômenos da natureza. Para nós isto fica claro quando Einstein cria cenários diversos onde as personagens das narrativas (entidades físicas) ganham novos significados. Portanto, a despeito de sua vital importância, o pensamento matemático por si só não é suficiente para o cientista elaborar interpretações acerca da natureza.

Além do que foi dito acima, sobre a importância do pensamento narrativo no processo criativo do cientista, consideramos que este tipo de pensamento é mais geral, ou seja, ele se apresenta em outras formas de organização de conhecimento, em outras formas de ordenar nossas experiências. Com isto, este tipo de pensamento pode ser utilizado como uma aproximação entre os estudantes e o conhecimento científico, enfatizando, sobretudo, o caráter criativo da atividade científica. Neste sentido, as narrativas atendem, parcialmente pelo menos, à condição de trabalhar o conhecimento científico de um ponto de vista mais coerente no que diz respeito à natureza do fazer científico. Em particular, a criação de cenários possíveis onde novas significações físicas são construídas mostra que o trabalho do cientista não é um desvelar dos mistérios da natureza, mas a proposição de interpretações coerentes com a realidade.

O desenvolvimento das histórias presentes nos experimentos mentais que analisamos tiveram como personagens principais conceitos físicos chaves que foram ganhando novos significados, coerentes com a nova teoria que estava sendo construída. Essas personagens foram: massas inercial e gravitacional, na primeira parte da narrativa que resultou no princípio de equivalência. Radiação e Relógio, que ganharam uma nova significação frente à suas dependências de potenciais gravitacionais. Relógios e réguas nos experimentos do disco em rotação, cuja significação mostrou que as coordenadas espaço-temporais não apresentavam um significado físico direto, como na TRE. Por fim, os “bastõezinhos” do mundo bidimensional criado por Einstein como forma de problematizar a finitude do nosso universo. Considerando isto, classificamos o tipo de narrativas que identificamos na gestação da TRG, como *Narrativas Conceituais*, devido ao seu funcionamento como forma de caracterizar conceitos científicos que atuam como personagens principais no desenvolvimento de histórias, cuja criação de cenários possíveis permite a formulação de experimentos mentais. O pensamento Matemático, em todas essas construções, estruturaram as ideias de Einstein. No entanto, considerando o papel de cada um desses tipos de pensamentos, é impossível reduzir um ao outro. É claro que a Matemática tem uma identidade maior com o conhecimento físico, mas defendemos, com base em nossa análise, que estes dois tipos de pensamentos se apresentam, no contexto de gestação da TRG, em uma espécie de dualidade. Eles atuam, sobretudo, de maneira complementar na elaboração de experimentos mentais, que resultaram na caracterização de importantes conceitos da Física.

Se entendemos que devemos proporcionar aos nossos alunos a possibilidade de articular um pensamento de tipo científico para compor suas visões de mundo frente à sociedade que estes são atuantes, então, trabalhar com narrativas pode ser uma maneira interessante para que eles criem cenários relevantes onde surjam problemas, de caráter científico, que possam ser encaminhados de acordo com infinitas possibilidades de desenvolvimento de uma história, utilizando, inclusive, a matemática como uma forma de encaminhar estes problemas. Considerar o pensamento narrativo (no sentido criativo, de

construção de cenários possíveis, de caracterização de personagens) e o pensamento matemático (no sentido estruturante, interpretativo, constitutivo dos conceitos físicos) no ensino de física, significa, em algum grau, inserir os alunos na forma de vida dos físicos, que utilizam estes tipos de pensamentos em sua prática de construir novas interpretações a respeito dos fenômenos físicos.

Com relação ao ensino da TRG, em particular, nossa investigação mostrou que os experimentos mentais sobre o disco em rotação são muito importantes, embora se dê ênfase apenas aos experimentos mentais no “elevador de Einstein”, isto é, os experimentos mentais feitos sobre um referencial com aceleração retilínea e uniforme. A TRG de Einstein se destacou, tanto dentro quanto fora da comunidade científica, pelo papel central de teorias matemáticas sofisticadas, e recentes à época, em sua formulação e estruturação. Nossa investigação historiográfica indicou que o pensamento narrativo que estruturou os experimentos mentais desenvolvidos no cenário de um referencial em rotação, foi essencial para que Einstein considerasse a necessidade de abandonar a geometria euclidiana, tendo seu pensamento sido arrastado pelas formas matemáticas neste contexto. Isto fez com que fosse possível para ele interpretar os fenômenos de gravidade como distorções da malha espaço-temporal. Assim, os experimentos mentais sobre o referencial rodando, estruturado pelos pensamentos narrativo e matemático, tem uma profunda relevância histórica e conceitual.

As características do espaço-tempo, especialmente sua curvatura, são muito enfatizadas no ensino da TRG. No entanto, o "elo perdido" na história da gênese desta teoria, ou seja, os experimentos sobre o disco, que levou Einstein às geometrias não-euclidianas, é muitas vezes desprezado. Um desdobramento da nossa pesquisa é que este importante experimento mental deve estar presente no ensino da TRG, especialmente se a história da ciência é tida como enfoque educacional. Além da importância histórica e conceitual deste experimento mental, ele é relativamente simples para ser explicado, mesmo no contexto do ensino médio. Assim, não existe qualquer motivo forte para ignorá-lo, por exemplo, em livros texto com abordagens históricas. Por fim, acreditamos que o significado físico completo do princípio de equivalência dentro da TRG só é

alcançado se considerarmos a importância conceitual e histórica dos experimentos mentais analisados nas seções 4.1 e 4.2.

Referências

ALMEIDA, Maria José P.M. (1999) Linguagens Comum e Matemática em Funcionamento no Ensino da Física. In: **II Encontro Nacional em Ensino de Ciências**, 1999, Valinhos – SP. Anais eletrônicos.

ALMEIDA, Maria José P.M.; SILVA, Henrique César.; MACHADO, José Luís M. (2001) Condições de Produção no Funcionamento da Leitura na Educação em Física. In: **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Vol. 1, n.1, 2001.

ARAÚJO, Inês Lacerda. (2001) **Linguagem e Realidade: do signo ao discurso**. Tese, Departamento de Letras da Universidade Federal do Paraná, 2001.

ARAÚJO, Inês Lacerda. (2007) Por uma concepção semântico-pragmática da linguagem. **Revista Virtual de Estudos da Linguagem – ReVEL**. V. 5, n. 8, março de 2007.

ATAÍDE, Ana Raquel. (2012) **O papel da matemática na compreensão de conceitos e resolução de problemas da termodinâmica**. Tese, Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das ciências da Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, 2012.

AVRAAMIDOU, Lina; OSBORNE, Jonathan. (2009) The Role of Narrative in Communicating Science. In: **International Journal of Science Education**, V. 31, n. 12, p. 1683-1707, 2009.

BACHELARD, Gaston. (1996/1938). **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Tradução: Estela dos Santos Abreu. – Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BAGDONAS, Alexandre; ZANETIC, João; GURGEL, Ivã. (2013) O grande erro de Einstein, a descoberta da expansão do universo e as reconstruções racionais da cosmologia. **XX Simpósio Nacional de Ensino de Física**, São Paulo, 2013.

BARBOUR, J. (1992). Einstein and Mach's Principle. *In*: Eisenstaedt, J & Kox, A. (Editors). **Studies in the History of General Relativity**, Vol. 3. Boston: Birkhäuser, pp.125-153.

BONIOLO, G.; BUDINICH, P. The Role of Mathematics in Physical Sciences and Dirac's Methodological Revolution. *In*. BONIOLO, G; BUDINICH, P.; TROBOK, M (Eds.) **The Role of Mathematics in Physical Sciences: Interdisciplinary and Philosophical Aspects**. Dordrecht: Springer, 2005. p. 75-96.

BRUNER, Jerome. (1965) The Growth of Mind. *In*: **Seventy-third Annual Convencion of the American Psychological Association**, Chicago, September 4, 1965.

_____. **Realidade mental, mundos possíveis**; tradução Marcos A. G. Domingues – Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.

_____. **A cultura da educação**; tradução Marcos A. G. Domingues.- Porto Alegre: Artmed Editora, 2001.

_____. **Fabricando histórias**: Direito, Literatura, Vida; Tradução Fernando Cássio. São Paulo: Letra e Voz, 2014. (Coleção Ideias)

CARLSEN, William S. (2007) Language and Science Learning. *In*: Sandra K. Abell and Norman G. Lederman (Ed) **Handbook of Research on Science Education**. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, Mahwah, New Jersey, London 2007.

CHASSOT, Attico. (2003) Alfabetização científica: uma possibilidade para a inclusão social. **Revista Brasileira de Educação**. Nº 22, 2003.

CORREIA, Mônica F. B. (2003) A constituição social da mente: (re)descobrimo Jerome Bruner e construção de significados. **Estudos de Psicologia**, vol. 8, núm. 3, septiembre-diciembre, 2003, pp. 505-513. Universidade Federal do Rio Grande do Norte Natal, Brasil.

CREASE, R. **As grandes equações:** a história das fórmulas matemáticas mais importantes e os cientistas que as criaram; tradução Alexandre Cherman. – Rio de Janeiro: Zahar, 2011.

DARRIGOL, O. The Genesis of the theory of relativity. **Séminaire Poincaré** (2005) 1-22.

Einstein, A. (1995/1909). 179. To Arnold Sommerfeld. In: Beck, A. (Trans.) Howard, D. (Cons.) **The collected papers of Albert Einstein**, Vol.5. Princeton University Press. Princeton: New Jersey.

_____. (1983/1911). Sobre a Influência da Gravidade na Propagação da Luz. *In:* LORENTZ, H.A.; EINSTEIN, A. & MINKOWSKI, H.: **O Princípio da Relatividade**. Col. Textos Fundamentais da Física Moderna, vol.I, 3a ed. Trad. Mário José Saraiva. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian; pp.127-140.

_____. (1996/1912). The Speed of Light and the Statics of the Gravitational Field. In: Beck, A. (Trans.) Howard, D. (Cons.) **The collected papers of Albert Einstein**, Vol.4. Princeton University Press. Princeton: New Jersey. pp.95-106

_____. (1983/1916). Sobre Os Fundamentos da Teoria da Relatividade Geral. *In:* LORENTZ, H.A.; EINSTEIN, A. & MINKOWSKI, H.: **O Princípio da Relatividade**. Col. Textos Fundamentais da Física Moderna, vol.I, 3a ed. Trad. Mário José Saraiva. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian; pp.141-214.

_____. (1999/1916). **A teoria da Relatividade Especial e Geral**; tradução do original alemão Carlos Almeida Pereira. – Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

_____. (1984/1922) **O significado da relatividade**; tradução da 5ª edição Mário Silva – Armênio Amado, editora – Coimbra, 1984.

_____. (1981/x) **Como vejo o mundo**; tradução de H. P. de Andrade. – Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

_____. (1982/1949) **Notas Autobiográficas**; Ed. Comemorativa/ traduzida e anotada por Paul Arthur; tradução de Aulyde Soares Rodrigues. – Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.

_____. (1984/x) **Escritos da Maturidade**: artigos sobre ciência, educação, religião, relações sociais, racismo, ciências sociais e religião; tradução de Maria Luiza X. de A. Borges. – Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994.

EINSTEIN, Albert. & INFELD, Leopold. (2008/1938) **A evolução da física**; tradução, Giasone Rebuá. – Rio de Janeiro: Zahar, 2008.

ESPINET, Mariona; IZQUIERDO, Mercè; BONIL, Josep.; DE ROBLES, S.Lizette Ramos. (2012) The Role of Language in Modeling the Natural World: Perspectives in Science Education. In: Fraser, B.J.; Tobin, K. G.; McRobbie (Ed.) **Second International Handbook of Science Education**. Editora Springer, Vol 1, 2012, pp. 1385-1403.

FEYNMANN, R. P. **The Character of Physical Law**. Cambridge, MA: The MIT Press, 1985, 173 p.

GANCHO, Cândida. V. **Como analisar narrativas**. São Paulo: Editora ática, 1997.

GARDNER, Howard. (2001) Jerome S. Bruner. In: **50 Grandes Educadores Modernos**: de Piaget a Paulo Freire. Joy A. Palmer; Liora Bresler; David E. Cooper (Eds). Mirna Pinsky (Trad.) – São Paulo: Contexto, 2006.

GASPAR, Alberto. (2004) Cinquenta anos de ensino de física: muitos equívocos, alguns acertos e a necessidade de recolocar o professor no centro do processo educacional. **Revista Educação**, ano 13, n.21, p.71-91, dez 2004.

GINGRAS, Y. (2001) What did mathematics do to physics? In: **History of Science**, v.39, p. 389-416, 2001.

GOTTSCHALK, Cristiane Maria Cornelia. (2010) O papel do método no ensino: da maiêutica socrática à terapia wittgensteiniana. In: **Educação Temática Digital**, Campinas, v.12, n.1, p.64-81, 2010.

GURGEL, Ivã. (2010) **Elementos de uma Poética da Ciência: Fundamentos Teóricos e Implicações para o Ensino de Ciências**. Tese, Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 2010.

HANSON, Norwood Russel. (1968) Observação e interpretação. In: **Filosofia da ciência**. Org. Morgenbesser, S. São Paulo: Ed. Cultrix, 1968.

KARAM, Ricardo. (2012) **Estruturação matemática do pensamento no ensino: Uma ferramenta teórica para analisar abordagens didáticas**. Tese, Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 2012.

KARAM, Ricardo; PIETROCOLA, Maurício. (2009) Habilidades técnicas versus habilidades estruturantes: resolução de problemas e o papel da matemática como estruturante do pensamento físico. In: **Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v.2, n.2, p.181-205, 2009.

KLASSEN, Stephen. (2007) The Application of Historical Narrative in Science Learning: The Atlantic Cable Story. In: **Science & Education**, n.16, p.335-352, 2007.

KLASSEN, Stephen; METZ, Don; MCMILAN, Barbara; CLOUGH, Michael; OLSON, Joanne. Building a foundation for the use of historical narratives. In **Science & Education**, n.16, p. 313-334, 2007.

LEME, Maria Isabel. (2009) Jerome Bruner: O ensino e suas formas. In: **Revista Educação: especial Pedagogia Contemporânea**, V.2, 2009.

LEMKE, Jay. (1997) **Aprender a Hablar Ciencia: Lenguaje, aprendizaje y valores**. Barcelona: Paidós, 1997.

MANNRICH, João Paulo. (2014) **Linguagem Matemática, Física e Ensino: como licenciandos discutem essa relação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

MARCONDES, Danilo. (2009) **Textos básicos de linguagem: de Platão a Foucault**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2009.

MARTINS, Lilian. História da ciência: objetos, métodos e problemas; **Ciência e educação**, v.11, n.2, p. 305-317, 2005.

MORENO, Arley Ramos. (2000) **Wittgenstein: os labirintos da linguagem, ensaio introdutório**. São Paulo: Moderna; Campinas, SP: editora da Universidade de Campinas, 2000.

NORONHA, André Batista. (2014). **Interpretando a Relatividade Especial: Discutindo o Debate Realismo e Antirrealismo Científicos no Ensino de Ciências**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2014.

NORRIS, Stephen P.; PHILLIPS, Linda M. (2003) How literacy in its fundamental sense is central to scientific literacy. **Science Education**, v. 87, n. 2, p. 224-240, 2003.

OGBORN, John. et al. **Explaining science in the classroom**. London: Open University. Press, 1996.

ORLANDI, Eni. (1999) **Análise do discurso: princípios e procedimentos**. Campinas, SP: Pontes, 1999.

PAIS, Abraham. (1993/1982) **Subtil é o senhor: vida e pensamento de Albert Einstein**; tradução Fernando Parente e Viriato Esteves – Gradativa publicações, 1993.

PATY, Michel. (1993) **Einstein Philosophe: la physique comme pratique philosophique**. Collection Philosophie d'Aujourd'hui. Paris: Presses Universitaires de France, 1993, 584 p.

_____.(1995) **A matéria roubada**, São Paulo: Edusp, 1995.

_____.(2005) Einstein e o papel da matemática na física. Conferência de encerramento, Trad. Em port. (Br) por Oscar João Abdounou, in Brolezzi, Antonio Carlos & Abdounour, Oscar João (eds.), SPHEM. Possibilidades de diálogos. **Anais do 1º Seminário Paulista de História e Educação Matemática** (10-12 out. 2005), Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo (Br), 2005, p. 33-56.

_____. (2008) **Einstein**. Tradução de Mário Laranjeira. – São Paulo: Estação liberdade, 2008.

PIETROCOLA, Maurício. (2002) A Matemática como estruturante do conhecimento físico. In: **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.19, n.1, p.89-109, 2002.

PIETROCOLA, Maurício. (2005) Linguagem e Estruturação do Pensamento na Ciência e no Ensino de Ciências. In: Pietrocola, Maurício; (Org.). **Filosofia, Ciência e História**. ed. São Paulo: Discurso editorial, 2005.

PÊCHEUX, Michel. (1969/1990). Análise Automática do Discurso (AAD-69). In: GADET & HAK (org). **Por uma análise automática do discurso**. Campinas: Ed. Unicamp, 1990, p.61-162.

POSSENTI, SÍRIO. (1988) **Discurso, estilo e subjetividade**. Editora Martins Fontes, 1988.

RAIMI, R. A. **Jerome Bruner, The Process of Education**, 2004 (acessado pela última vez em dezembro de 2014 através do link: <http://www.math.rochester.edu/people/faculty/rarm/bruner.html>)

REDISH, E. (2005). Problem solving and the use of math in physics courses. Invited Talk Presented At The Conference, **World View On Physics Education 2005:Focusing On Change**, Delhi, August 21-26.

RENN, Jürgen. (2007). Classical Physics in Disarray: The Emergence of the Riddle of Gravitation. In: Renn, J. (Ed.) **The Genesis of General Relativity**, Vol. 1, Einstein's Zurich Notebook: Introduction and source. Springer. pp. 21-80.

RIBEIRO, Ruth; MARTINS, Isabel. (2007) O potencial das narrativas como recurso para o ensino de ciências: uma análise em livros didáticos de física. In: **Ciência & Educação**, V. 13, n. 3, p. 293-309, 2007.

ROBERTS, Douglas. (2007) Scientific Literacy/ Science Literacy. In: Sandra K.Abell and Norman G. Lederman (Eds.) **Handbook of Research on Science**

Education. Lawewncw Erlbaum Associetes, Publishers, Mahwah, Nex Jersey, London 2007.

ROMERO, Talita Raquel Luz. **Modelos e explicações:** a apropriação e o uso de entidades científicas pelos alunos. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2012.

SASSERON, Lucia Helena; CARVALHO, Ana Maria Pessoa. (2011) Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, V.16(1), pp. 59-77, 2011.

SILVA, Cibele. (2005) Uma análise histórica do uso de modelos no eletromagnetismo. **IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 2005, Bauru. Bauru: ABRAPEC, 2005

SILVA, Cibele Celestino. (2007) The Role of Models and Analogies in the Eletromagnetic Theory: a Historical Case Study. In: **Science & Education**, v.16, n.4, p. 835-848, 2007.

SILVA, Cibele Celestino; PIETROCOLA, Maurício. (2003) O papel estruturante da matemática na teoria eletromagnética: um estudo histórico e suas implicações didáticas. In: **IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 2003, Bauru. Bauru: ABRAPEC, 2003.

SILVA, Henrique; ALMEIDA, Maria José. (2005) O deslocamento de aspectos do funcionamento do discurso pedagógico pela leitura de textos de divulgação científica em aulas de física. In. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vol. 4, n. 3, 2005.

STACHEL, John (2002/1979 a). Einstein's Odyssey: His Journey from Special to General Relativity. In: **Einstein from "B" to "Z"**. Einstein Studies, vol.9. Boston: Birkhäuser, 2002, pp.225-232.

_____. (2002/1979 b). The Genesis of General Relativity. In: **Einstein from "B" to "Z"**. Einstein Studies, vol.9. Boston: Birkhäuser, 2002, pp.233-244.

_____. (2002/1980). The Rigidly Rotation Disk as the “Missing Link” in the History of General Relativity. *In: Einstein from “B” to “Z”*. Einstein Studies, vol.9. Boston: Birkhäuser, 2002, pp.245-260.

_____. (2002). The first two acts. *In: Einstein from “B” to “Z”*. Einstein Studies, vol.9. Boston: Birkhäuser, 2002, pp.261-292.

_____. (2005) O manuscrito de Einstein de 1912 como pista para o desenvolvimento da teoria da relatividade restrita. **SCIENTIA & STUDIA**, v. 3, n.4, p. 583-96, 2005.

SUTTON, Clive. (1995) **Words, science and learning**. Buckingham: Open University Press, 1995.

_____. (1997) Ideas sobre la Ciencia e Ideas sobre el Lenguage. *In: Alambique Didactica de las Ciencias Experimentales*, n.12, 1997.

_____. (1998) New Perspectives on Language in Science. *In: FRASER, B.J. E TOBIN, K.G. (eds) International Handbook of Science Education*. Inglaterra: Kluwer Academic Publiser, 1998.

_____. (2003) Los Profesores de ciencias como Profesores de Lenguage. *In: Enseñaza de las Ciencias*. Vol. 21, n.1, 2003.

VARGAS, M.; História da matematização da natureza. **Estudos Avançados**, v.10, n.28, p.249- 276, 1996.

WITTGENSTEIN, Ludiwig. Investigações Filosóficas. *In: Os Pensadores: Wittgenstein*. São Paulo; Ed. Nova Cultura Ltda, 1999.

YORE, Larry; BISANZ, Gay; HAND, Brian (2003) Examining the Literacy Component of Science Literacy: 25 Years of Language Arts and Science Research. **International Journal of Science Education**, V.25, n.6, 2003.