

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**O Ensino da Teoria da Relatividade Especial no Nível Médio:
Uma Abordagem Histórica e Conceitual¹**

Jeferson Fernando de Souza Wolff

Dissertação realizada sob a orientação do Prof. Dr. Paulo Machado Mors apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Porto Alegre

2005

¹ Trabalho parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Dedico este trabalho:

A meus pais, pelo carinho e compreensão;

A Deus, por ter me dado capacidade e força de vontade.

Agradeço

À Marcella Selbach Garcia, por sua atenção e compreensão em todos os momentos. Por suas correções de Português, e pelas incansáveis leituras comigo aos finais de semana.

À direção e professores da Escola Técnica Municipal Farroupilha, por todo apoio e companheirismo ao longo deste trabalho.

À direção e professores do Colégio Cenequista Carlos Maximiliano, pela possibilidade e incentivo à aplicação da proposta.

À professora Rosa Maria Braga, pela ajuda no embasamento teórico.

Aos tios José Antonio e Nilza Carpenedo pela constante torcida e apoio.

À professora Alda Marici da Silva Silveira, pelas correções de Português.

Ao meu irmão, Jacson Wolff, pela amizade e companheirismo.

À Zuleika Berto pelas correções nas referências bibliográficas.

Ao professor orientador Dr. Paulo Machado Mors, pela sua dedicação, paciência, colaboração e principalmente pela confiança em mim depositada para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. A PROPOSTA | 13 |
| 2.1. Justificativa..... | 13 |
| 2.2. Objetivos..... | 14 |
| 2.2.1. <i>Objetivos do material didático</i> | 15 |
| 2.2.2. <i>Objetivos da unidade de apoio</i> | 15 |
| 2.3. Material e métodos..... | 15 |
| 2.4. Outras iniciativas | 17 |
| 3. BASES TEÓRICAS | 22 |
| 3.1. A importância do sócio-histórico, segundo Vygotsky..... | 22 |
| 3.1.1. <i>Mediação, instrumentos e signos</i> | 24 |
| 3.1.2. <i>Níveis de desenvolvimento psicológico</i> | 25 |
| 3.1.3. <i>As implicações pedagógicas da teoria de Vygotsky</i> | 26 |
| 3.1.4. <i>Implicações da teoria de Vygotsky para a proposta</i> | 28 |
| 3.2. Aprendizagem significativa de Ausubel..... | 29 |
| 3.3. A teoria de educação de Novak..... | 30 |
| 3.4. Implicações das teorias de Ausubel e Novak para a proposta | 32 |
| 4. ELABORAÇÃO DO PRODUTO..... | 35 |
| 4.1. Elaboração do texto dos alunos | 35 |
| 4.2. Elaboração do texto dos professores | 38 |
| 5. APLICAÇÃO DA PROPOSTA..... | 40 |
| 5.1. Descrição da aplicação do material em sala de aula..... | 40 |
| 5.1.1. <i>Tópico: pensamento aristotélico e Relatividade galileana</i> | 41 |
| 5.1.2. <i>Tópico: Isaac Newton e movimento relativo dos corpos</i> | 42 |
| 5.1.3. <i>Tópico: Histórico da Eletricidade e Magnetismo até a</i> | |
| <i>unificação</i> | 43 |
| 5.1.4. <i>Tópico: Problema do eletromagnetismo com a Mecânica</i> | |
| <i>Clássica e origem da Relatividade Especial</i>..... | 45 |
| 5.1.5. <i>Tópico: Relatividade da simultaneidade</i> | 46 |
| 5.1.6. <i>Tópico: Dilatação temporal e contração do espaço</i>..... | 47 |
| 5.1.7. <i>Tópico: Adição de velocidades</i> | 48 |
| 5.1.8. <i>Tópico: Energia relativística</i> | 49 |
| 5.1.9. <i>Tópico: Paradoxo dos gêmeos</i> | 50 |
| 5.1.10. <i>Tópico: Relatividade Geral</i>..... | 50 |
| 5.2. Avaliação do questionário antes e após a aplicação da proposta.... | 51 |

| | |
|--|-----|
| 5.3. Análise da prova..... | 73 |
| 5.4. Considerações finais..... | 76 |
| 6. DEPOIMENTOS..... | 77 |
| 6.1. Transcrição de depoimentos..... | 77 |
| 6.2. Considerações finais..... | 80 |
| 7. ANÁLISE DE LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO | 81 |
| 7.1. A análise realizada | 81 |
| 7.2. Comentários finais | 91 |
| 8. RESULTADOS E CONCLUSÕES | 93 |
| REFERÊNCIAS | 101 |
| APÊNDICE A..... | 104 |
| APÊNDICE B | 148 |
| APÊNDICE C | 169 |
| APÊNDICE D | 171 |

Resumo

Este trabalho relata uma experiência de inserção do ensino da teoria da Relatividade Especial com alunos do terceiro ano do ensino médio. A aplicação do projeto em sala de aula foi parte integrante das atividades curriculares normais dos alunos, em duas escolas, uma localizada no município de São Jerônimo-RS, Colégio Cenecista Carlos Maximiliano, e outra localizada no município de Triunfo-RS, Escola Técnica Municipal Farroupilha. Foi elaborado um texto para os alunos, contendo a base histórica e conceitual do tema, além de um manual de auxílio aos professores. O texto dos alunos contempla os principais fatos históricos, desde Aristóteles até as conclusões de Albert Einstein, que levaram à construção da Relatividade Especial em 1905. São tratados os conceitos de simultaneidade, dilatação temporal, contração do comprimento, adição de velocidades e energia relativística. A experiência é avaliada, principalmente através de um questionário respondido pelos alunos, antes e após a aplicação do projeto. Também foi feita uma análise de alguns livros de Física do ensino médio, sobre o tratamento dado à teoria da Relatividade Especial. O trabalho foi embasado na teoria de desenvolvimento humano histórico-cultural de Vygotsky e na teoria de aprendizagem significativa de Ausubel e Novak. Acreditamos ter mostrado que é possível incluir o tratamento regular da teoria da Relatividade Especial em escolas de nível médio, contemplando assim os Parâmetros Curriculares Nacionais que apontam para uma ênfase à Física contemporânea.

Abstract

This work reports an experience assigning Special Relativity theory at the last year of the Brazilian high-school curriculum. The project, applied in classroom as part of the usual student's activities, was developed in two schools, one located at the town of São Jerônimo (a private school), the other located at the town of Triunfo (a public school), both at the southern State of Rio Grande do Sul. A student's text was written, covering the historical and conceptual basis of the matter. Also, an instructor's manual was prepared. The student's text covers the main historical facts, from Aristotle to Einstein's conclusions, which led to the development of the Special Relativity, in 1905. Studied concepts were simultaneity, temporal dilatation, length contraction, addition of velocities and relativistic energy. The main instrument for evaluating the experience was a test answered by the students, before and after the project's application. Also, some Brazilian Physics high-school texts were analyzed, in respect to the Special Relativity theory. We worked on the basis of Vygotsky's theory of human development, as well as the significant learning theory of Ausubel and Novak. We believe we have shown that it is possible to include a regular study of the Special Relativity theory in the high-school level, so observing the Brazilian National Curriculum Parameters, which point towards an emphasis on Contemporary Physics.

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos fenômenos físicos é de fundamental importância na formação de um cidadão consciente e crítico frente à evolução pela qual passa o mundo. A Física busca descrever, da forma a mais precisa, os fenômenos da Natureza, procurando a sua compreensão. Seu estudo, portanto, só poderá beneficiar aquele que pretende se situar no meio social. Além dos conteúdos da Física Clássica que tradicionalmente são ensinados, é fundamental, hoje, que também sejam trabalhados, na escola, os conhecimentos gerados pelos físicos a partir do início do século vinte, denominados geralmente de Física Moderna e Contemporânea. O cotidiano gera novos desafios que, cada vez mais, requerem uma boa preparação do cidadão, incluindo-se aí uma noção das áreas científicas. Citando Pietrocola [33], *Hoje, ser Alfabetizado Científica e Tecnologicamente² (ACT) é uma necessidade do cidadão moderno.*

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) [11] destacam que *os objetivos do Ensino Médio em cada área do conhecimento devem envolver, de forma combinada, o desenvolvimento de conhecimentos práticos, contextualizados, que respondam às necessidades da vida contemporânea, e o desenvolvimento de conhecimentos mais amplos e abstratos, que correspondam a uma cultura geral e a uma visão de mundo.* Mais adiante, acrescentam que *é preciso discutir qual Física ensinar para possibilitar uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada.* Dentro destes objetivos, destacamos a necessidade de inclusão dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea, pois além de inserirem-se como cultura geral, são fundamentais para a compreensão do mundo contemporâneo.

Porém, ainda há uma semelhança e uma pobreza muito grande nos currículos de Física das escolas de ensino médio. Tradicionalmente, estão divididos em blocos que seguem a seqüência apresentada na maioria dos livros didáticos, sem que haja, por exemplo, a preocupação com o conhecimento histórico da Ciência. Com relação aos aspectos históricos da Ciência, os PCNs salientam que estes são fundamentais para a compreensão da Ciência como construção humana, entendendo que o seu desenvolvimento deu-se por acumulação, continuidade ou rupturas de paradigmas.

² Pietrocola utiliza, ao invés da expressão Alfabetização Científica e Tecnológica, a expressão Alfabetização Científica e Técnica.

Os tópicos que estamos acostumados a trabalhar são: Mecânica, Termometria, Calorimetria, Fluidos, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo. Dessa forma, toda a Física do século passado fica excluída.

Assim, é imprescindível que sejam mais explorados, ou mesmo, em muitos casos, introduzidos, no ensino médio, conteúdos de Física Moderna. Várias são as propostas, mas a aplicação prática ainda é muito limitada. Podemos citar Terrazzan [45], que afirma: *A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau*³. E, como ponto de partida, a Teoria da Relatividade Especial (Restrita) parece-nos uma boa opção, já que, historicamente, esta foi a precursora do que hoje chamamos de Física Moderna, mesmo já sendo, por alguns, considerada como parte da Física Clássica.

A Teoria da Relatividade Especial sempre teve um grande apelo para o público em geral. É freqüente observarmos a utilização da relação $E = m.c^2$, sem maiores esclarecimentos sobre seu real significado. Neste ano (2005), esta teoria completa seu centenário e esta é uma ótima oportunidade para começarmos a tratá-la sistematicamente em sala de aula, no ensino médio. Esse esforço fará também com que o tema seja mais divulgado fora da sala de aula e, inclusive, alguns mitos poderão ser derrubados.

Dessa forma, consideramos este conteúdo como potencialmente significativo para alunos do ensino médio, principalmente pelo interesse que observamos despertar nos mesmos. Muitos deles já têm alguma familiaridade com o tema, devido à forte influência que os meios de comunicação exercem sobre eles. Estas influências provêm das mais variadas formas de divulgação científica. Como exemplo, podemos citar canais televisivos, como *Discovery Channel*, revistas como a *SuperInteressante*, *Galileu Galilei* e *Ciência Hoje*, que são de acesso fácil aos alunos e que apresentam as mais diversas curiosidades da Ciência e difundindo o que ocorre na comunidade científica. Outra forma de divulgação científica a que os nossos alunos têm acesso (infelizmente, nem todos ainda) são os *sites* da internet ou programas multimídia, que utilizam os mais diversos recursos múltiplos, como

³ O artigo referido foi publicado em 1992, quando ainda se utilizava a terminologia segundo grau, ao invés de ensino médio.

som, imagem, vídeos e textos, facilitando, assim, a compreensão dos fenômenos envolvidos.

Porém, perguntamos: será que os nossos alunos possuem a capacidade de compreender de forma correta essas diversas formas de divulgação científica? Sabe-se que a internet, principalmente, e até mesmo algumas revistas, mesmo quando provêm de uma proposta editorial séria e confiável, por vezes transmitem conceitos muito superficiais ou errôneos. Podemos citar Rodrigues [38]: *O estudo da física deve contribuir na formação de um cidadão para que este possua formas de atuar com discernimento frente a esse mundo modificado! A sociedade deve ser capaz de absorver as novas produções científicas, entendendo minimamente as informações que lhe chegam através dos meios de comunicação!* Então, estes meios não podem prescindir da escola, que tem a obrigação de orientar o estudo do aluno, desempenhando o seu papel de facilitadora na aquisição do conhecimento e na formação de um cidadão consciente e crítico frente ao grande número de informações que recebe todos os dias.

No entanto, muitas escolas do ensino médio ainda não estão preparadas para a inserção de conteúdos, como o da teoria da Relatividade Especial. E, mesmo que a escola esteja consciente da validade de se tratar a Teoria da Relatividade ainda no ensino médio, esbarra na dificuldade em encontrar material didático conveniente para esse mister. Um texto que trate o assunto no nível adequado, com uma contextualização histórica apropriada, será de muita valia para o professor.

Foi visando a este objetivo que nos propusemos a elaborar um texto que contemple os aspectos acima enunciados. Junto a isso, organizamos um material de apoio ao professor. A proposta foi aplicada em três turmas de terceira série do ensino médio, de duas escolas diferentes: duas turmas da Escola Técnica Municipal Farroupilha, localizada no município de Triunfo-RS e a outra turma do Colégio Cenecista Carlos Maximiliano, localizado no município de São Jerônimo-RS, sendo a primeira, escola pública e a segunda, particular.

Tanto para a elaboração do texto dos alunos quanto na aplicação do projeto, baseamo-nos na teoria de desenvolvimento humano histórico-cultural de Vygotsky [49], que considera a idéia de que o desenvolvimento humano resulta das interações sociais, formando as funções psicológicas superiores. Dessa forma, deve haver uma interação professor-aluno, não se centralizando o ensino nem no professor, nem no aluno. Citando os

PCNs temos: *O aprendizado não deve ser centrado na interação individual de alunos com materiais instrucionais, nem se resumir à exposição de alunos ao discurso professoral, mas se realizar pela participação ativa de cada um e do coletivo educacional numa prática de elaboração cultural.* Assim, buscamos montar o material didático e, principalmente, o material de apoio aos professores, contemplando a importância da interação desses com os alunos. Ao trabalharmos o material com os alunos, pôde-se verificar a importância da interação professor-aluno, que está descrita no Capítulo 5.

Também nos valemos da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel e Novak [4]. A aprendizagem significativa é um processo pelo qual uma nova informação relaciona-se com aspectos relevantes da estrutura de conhecimento do indivíduo, ou seja, a nova informação relaciona-se com conceitos pré-existentes na estrutura cognitiva do indivíduo, denominados de *subsunçores*. Conforme Ausubel, o fator isolado que mais influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe. Dessa forma, cabe ao professor identificar esses conhecimentos já existentes e ensinar de acordo. Este foi um dos objetivos do questionário aplicado aos alunos [Apêndice C], onde buscamos identificar quais eram os conhecimentos já existentes no cognitivo dos alunos para, a partir de então, construirmos o novo conhecimento.

O Capítulo 2 apresenta a justificativa e os principais objetivos que buscamos alcançar na preparação desse material, levando em consideração a Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) [10] e os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) [11]. Ainda neste capítulo, apresentamos uma revisão bibliográfica de experiências, em nível nacional, do ensino da teoria da Relatividade Especial no nível médio.

No Capítulo 3 apresentamos o nosso referencial teórico, destacando a teoria sócio-interacionista de Vygotsky e a teoria da aprendizagem de Ausubel e Novak, descrevendo as principais implicações para a elaboração e aplicação da proposta.

Os detalhes da elaboração do texto dos alunos e do material de apoio aos professores são apresentados no Capítulo 4, bem como as principais referências bibliográficas utilizadas para a preparação desses materiais.

No Capítulo 5 descrevemos a aplicação da proposta, dividindo-a em três seções. A primeira é sobre a aplicação, nas três turmas, do texto dos alunos, onde comentamos como cada aula foi trabalhada. Na segunda seção apresentamos uma avaliação do resultado da aplicação do questionário (Apêndice C) que foi apresentado aos alunos antes e após o

estudo da teoria, fazendo-se uma rápida comparação dos resultados. E, na última seção, fizemos uma análise de desempenho da prova (Apêndice D) que foi aplicada nas três turmas.

Alguns depoimentos de alunos são transcritos no Capítulo 6. Procuramos transcrever literalmente esses depoimentos.

Uma revisão de livros didáticos acabou sendo naturalmente necessária. Analisamos 13 obras, que são utilizadas no ensino médio nacional para a aprendizagem de Física. Esta análise é apresentada no Capítulo 7.

Os resultados e os comentários finais são tecidos no Capítulo 8.

Ao final encontram-se os apêndices, sendo o Apêndice A o texto dos alunos; o Apêndice B o texto dos professores; o Apêndice C o questionário para análise do conhecimento conceitual acerca da Relatividade Especial e o Apêndice D a prova aplicada ao final do projeto.

2. A PROPOSTA

2.1. Justificativa

Para que a mudança no Ensino Médio, pretendida pela LDB [10] e pelos PCNs [11], ocorra, é necessário que se tenha professores bem informados, atualizados e que disponham de recursos para tal implementação. É imprescindível que haja, além de uma atualização curricular, uma mudança nas abordagens de ensino adotadas, ensinando-se além da Física Clássica, também a Física Moderna e Contemporânea (FMC).

Mas por que ensinarmos a teoria da Relatividade Especial no ensino médio?

Primeiramente, por esta possuir uma grande difusão em nossa sociedade, pois provavelmente esta seja a teoria mais difundida pela mídia. Em segundo lugar, a teoria da Relatividade Especial é considerada como um marco histórico, tanto no pensamento científico quanto para a sociedade em geral, pois os seus conceitos são completamente diferentes daqueles presentes na Física Clássica.

Conforme Rodrigues [38] *A inserção da TRR⁴ se funda basicamente em três aspectos: a mudança de padrão de raciocínio e interpretação da realidade aliada à abstração e sofisticação do pensamento, graças à concepção de tempo como uma quarta dimensão; a possibilidade dessa teoria servir de porta de entrada para outros tópicos da FMC e, finalmente, pela necessidade de abordagem de um tema tão presente na sociedade através da divulgação científica.*

Os PCNs nos alertam: *Para o Ensino Médio meramente propedêutico atual, disciplinas científicas, como a Física, têm omitido os desenvolvimentos realizados durante o século XX e tratam de maneira enciclopédica e excessivamente dedutiva os conteúdos tradicionais.*

Logo, tratar a Relatividade Especial no ensino médio é uma necessidade óbvia quando lembramos que, para a maioria dos alunos, essa será a única oportunidade de estudar aspectos básicos dessa teoria. No entanto, a precariedade dos livros-texto disponíveis, no que diz respeito ao assunto, não incentiva os professores a planejarem seu ensino.

⁴ TRR – Teoria da Relatividade Restrita (ou Especial).

Para isso, torna-se necessária a produção de materiais que possam ser utilizados diretamente pelos professores, já que a maioria deles possui uma sobrecarga de trabalho e, como consequência, a falta de tempo para que eles mesmos possam produzir materiais e elaborar novas estratégias de ensino. Esses materiais devem, ao mesmo tempo, ter um custo acessível e motivar os alunos.

Assim, consideramos válida a idéia de se produzir um material visando a este objetivo. Além do material do aluno, um texto do professor também é necessário como estímulo para que o docente se entregue à tarefa.

Uma abordagem que contemple o aspecto histórico nos pareceu uma oportunidade também para que se dê ao aluno uma idéia do que é o fazer Ciência, procurando corrigir erros de concepção que os alunos tenham a esse respeito.

Além disso, a exploração histórica da teoria da Relatividade Especial possibilita a introdução de outros tópicos de Física Moderna, ou seja, serve de porta de entrada para o entendimento da mudança dos conceitos da Física Clássica para a Física Moderna.

2.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi o da elaboração de um texto didático para o ensino da Relatividade Especial no nível médio, adotando como linha norteadora os aspectos históricos que lhe concerne. Além disso, foi elaborada uma unidade de apoio para os professores que adotarem o material produzido, facilitando o tratamento do material didático.

De forma natural, apresentou-se a necessidade da realização de um diagnóstico de alguns livros didáticos mais utilizados no ensino médio que tratam a Relatividade Especial. O principal objetivo foi o de realizar uma análise conceitual de seus conteúdos de Relatividade Especial, verificando o nível abordado por eles e eventuais incorreções conceituais.

2.2.1. *Objetivos do material didático*

O material didático elaborado tem por finalidade disponibilizar aos alunos do nível médio um texto para o estudo da Relatividade Especial que seja claro e objetivo, contemplando aspectos históricos, permitindo-lhes formar uma visão crítica frente às informações sobre o tema que estão ao seu alcance e ajudando a desmistificar a visão empirista/indutivista que em geral os alunos possuem da História da Ciência.

Pretende-se, ainda, contemplar a recomendação dos PCN [11] no que diz respeito à abstração dos conceitos de Física a partir de elementos concretos que fazem parte da cultura do aluno.

2.2.2. *Objetivos da unidade de apoio*

No que se refere aos propósitos da unidade de apoio, esta pretende fornecer aos professores um texto facilitador que, juntamente com o material didático, subsidiem-nos no ensino dos conceitos básicos da Relatividade Especial, inclusive com instrumentos de avaliação sugeridos para aplicação concomitante ao estudo do tema.

Espera-se ainda incentivar os professores ao desenvolvimento de conteúdo de Física Moderna, em especial o tópico de teoria da Relatividade Especial, buscando a inclusão destes conteúdos no ensino médio.

2.3. Material e métodos

Os materiais desenvolvidos foram o texto dos alunos e o texto de apoio aos professores. O material dos alunos está dividido em duas partes: uma histórica e outra conceitual.

Iniciamos o texto dos alunos apresentando a parte histórica da evolução do conhecimento científico. Dentro deste contexto, destacamos o pensamento de Aristóteles, que prevaleceu até o século XVI, onde predominava a visão empirista/indutivista. A seguir, destacamos a importância dos trabalhos de Galileu, em especial o que Einstein

chamou de Relatividade galileana. Um dos pontos de grande relevância da obra de Galileu foi a mudança de paradigma do pensamento filosófico (aristotélico) para um pensamento mais matemático e experimental. Claro que não foi Galileu quem mudou este paradigma sozinho. Antes dele, ocorreram trabalhos fundamentais para tal mudança, como os de Tycho Brahe, Descartes e Johannes Kepler.

O texto dos alunos também contempla alguns fatos da obra de Isaac Newton, destacando as suas três leis do movimento, a transformação de velocidade e aceleração de um referencial inercial para outro e o importante fato da equivalência dessas referências para as leis da Mecânica.

E, finalmente, descrevemos os principais fatos da evolução do conhecimento do Eletromagnetismo, desde as primeiras observações na Grécia até a unificação da Eletricidade com o Magnetismo por Maxwell. Com esta unificação, passou-se a ter alguns paradoxos, dentre os quais um resultou na teoria da Relatividade Especial em 1905.

Na parte conceitual, foram abordados os principais conceitos da teoria da Relatividade Especial como a relatividade da simultaneidade, dilatação temporal, contração do comprimento e energia relativística.

O material dos alunos foi aplicado a três turmas, sendo uma no Colégio Cenecista Carlos Maximiliano, no município de São Jerônimo-RS, com 19 alunos e duas turmas na Escola Técnica Municipal Farroupilha, no município de Triunfo-RS, com uma turma de 32 e outra de 36 alunos. É importante destacar que a primeira escola é particular e a segunda, pública. Deste modo, infelizmente, as realidades são bastante diferentes.

O material foi trabalhado sob a forma de apresentação, com a utilização do *software PowerPoint*. Como nenhuma das duas escolas possuía projetor, utilizamos uma conexão com a televisão para que pudessemos realizar a apresentação dos *slides*.

Foi aplicado um questionário (Apêndice C) a todos os alunos antes e após a aplicação do material, realizando-se, ao final, uma comparação das respostas dos alunos.

Durante as aulas, foram colhidos depoimentos e impressões dos alunos sobre o conteúdo e a maneira como este estava sendo desenvolvido.

Visando à aplicabilidade da proposta por outros docentes, foi elaborado um texto de apoio para professores de Física, com subsídios para a utilização do material elaborado, bem como com exemplificações e indicação de bibliografias auxiliares.

2.4. Outras iniciativas

Realizamos uma busca de Dissertações e Teses, no *site* da CAPES, que abordassem o assunto de nossa Dissertação, ou seja, relatos sobre a inserção da teoria da Relatividade Especial no ensino médio. Foi possível verificar como são limitadas as publicações sobre o tema.

A seguir, passaremos a descrever os principais trabalhos encontrados.

A dissertação de Köhnlein [23], intitulada *Uma discussão sobre a natureza da ciência no ensino médio: Um exemplo com a teoria da Relatividade Restrita*, apresenta como principal enfoque as concepções ainda existentes sobre o empirismo-indutivismo da Ciência. A autora busca mostrar neste trabalho que a visão empirista-indutivista é considerada inadequada pela filosofia da Ciência Contemporânea, argumentando sobre as suas limitações. Para isso, utiliza-se de um módulo didático para o ensino médio sobre a teoria da Relatividade Especial, demonstrando o caráter provisório de uma teoria; no caso, da Mecânica newtoniana. Neste trabalho a autora descreve as principais concepções empiristas-indutivistas no ensino da Ciência. Além disso, aborda a importância do papel da história e da filosofia no ensino da Física.

O módulo didático representa uma tentativa de levar para a sala de aula um conteúdo com uma abordagem diferente daquela que é tradicionalmente adotada nos conteúdos da Física Clássica, com uma visão mais crítica sobre a natureza da Ciência, introduzindo a história e a filosofia da Ciência. Este módulo didático é organizado em 15 aulas, onde são explicados, em cada uma, quais são os principais objetivos a serem atingidos. Este módulo didático busca ilustrar o período de crise do final do século XIX, apresentando os conceitos da teoria da Relatividade Especial de forma conceitual, sem a preocupação com dedução de fórmulas.

A autora também aplica um questionário antes e após a aplicação do projeto, para verificar quais são as alterações quanto às concepções dos alunos ao empirismo-indutivismo. A proposta não busca diretamente a inserção dos conceitos da teoria da Relatividade Especial no ensino médio mas, sim, se utiliza dela para ilustrar como ocorre a mudança de paradigma da Mecânica Clássica para a Mecânica Relativística, ilustrando a

insustentabilidade da concepção empirista-indutivista. Neste trabalho não é disponibilizado nenhum material de distribuição para os alunos.

Ostermann [32], em sua Tese de doutoramento, realizou uma pesquisa com físicos, físicos pesquisadores em ensino de Física e professores de Física do ensino médio. Para esta pesquisa, utilizou a técnica Delphi para determinar quais eram os conteúdos de Física Moderna e Contemporânea mais sugeridos para a inserção no ensino médio. Entre os temas sugeridos, a teoria da Relatividade Especial, em um primeiro momento, teve 50% das respostas, ficando atrás apenas da Mecânica Quântica, com 63%. Uma segunda rodada de perguntas solicitou aos participantes um posicionamento frente aos tópicos sugeridos na primeira rodada, quanto à sua inserção no ensino médio. Feita a análise dos resultados, Ostermann enviou cópias dos mesmos aos participantes e realizou uma terceira rodada de perguntas sobre a validade da inserção de cada tema no ensino médio. A teoria da Relatividade Especial teve 60,7% de concordância de sua inserção no ensino médio, 16,4% não opinaram e 23% discordaram. Ficou evidente, com o trabalho de Ostermann, que para o grupo de entrevistados há necessidade de inserirmos no ensino médio a teoria da Relatividade Especial. A Tese de Ostermann contemplou outro grande tema que ainda é muito pouco tratado no ensino médio, que é a Física de partículas.

Outro trabalho encontrado na literatura nacional é a Tese de doutoramento de Arruda [2], *Entre a inércia e a busca: reflexões sobre a formação em serviço de professores de Física do ensino médio*. Neste trabalho, o autor organizou um grupo de professores que chamou de Grupo de Física Moderna (GFM), do norte do Paraná, e acompanhou-o por um período de dois anos para a inserção da Física Moderna no ensino médio. O autor pôde observar que uma das dificuldades para a inserção da Física Moderna no ensino médio passa pelo despreparo e falta de conhecimento dos professores. Dos integrantes do GFM, apenas 13% possuíam graduação específica em Física. Mas o principal objetivo deste trabalho estava não apenas na inserção dos conteúdos de Física Moderna no ensino médio, mas na análise comportamental dos professores. Verificou-se que muitos professores, mesmo tendo um problema, que era a inserção da Física Moderna, ainda permaneciam em um estado que o autor denominou de inercial, em uma situação de passividade diante do problema. O trabalho do GFM foi dividido em duas etapas: a

primeira era entender o conteúdo novo a ser trabalhado, e, a segunda, planejar este tópico para inserí-lo em sala de aula. As dificuldades começaram a ser observadas no segundo ponto, na elaboração do material a ser aplicado em sala de aula. Arruda comenta que na execução dos trabalhos é que os problemas começaram a surgir, revelando desta maneira que a primeira etapa (conhecimento do novo conteúdo) não havia sido bem sucedida. Neste momento os professores começaram a utilizar estratégias de fuga, visando protelar ao máximo a aplicação do material. Em muitos momentos, eles apresentavam uma situação de ambigüidade, como se ao mesmo tempo quisessem e não quisessem mudar as coisas. O autor chega a comentar: *Eis, pois, a situação do sujeito dividido entre uma busca para melhorar a sua prática e, a inércia, a repetição de uma satisfação baseada no mínimo esforço.* Como podemos verificar, a inserção de Física Moderna ficou em segundo plano para o autor, mas é válida a sua experiência, pois demonstra que a dificuldade da inserção desses tópicos começa pelos professores. Se não se propuserem a inserir estes conteúdos, praticamente serão inválidos quaisquer outros esforços para este mister. A conclusão a que o autor chega é: *o discurso denominado do conhecimento, subdividido em discurso do conteúdo, pedagógico e da pesquisa, pode, eventualmente, capturar o professor, mantendo-o em um circuito em que predominam as atitudes mais ativas e favorecendo alguma mudança de conduta perante seus problemas de sala de aula.* Não é apresentado nenhum texto didático para os alunos, apenas algumas sugestões de leitura.

Outro trabalho encontrado na bibliografia nacional é a Dissertação de Rodrigues [38], *Inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio: uma nova proposta.* Neste trabalho, o autor busca mostrar a necessidade da inserção dos tópicos da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, dando especial atenção à teoria da Relatividade Especial. Foram abordadas as questões históricas da teoria da Relatividade Especial, as suas conseqüências, e a receptividade da mesma na Europa, no Brasil e na França. A ferramenta utilizada para este propósito foi a Transposição Didática proposta por Chevallard e adaptada para a Física através de pesquisadores como Caillot e Martinand. Através desta ferramenta foram analisados livros e materiais de divulgação presentes no cotidiano da sociedade como um todo. Dentro desta análise, traçou-se o perfil da Transposição Didática da teoria da Relatividade nos livros analisados, que se caracterizaram mais por seu caráter informativo do que formativo. Este trabalho visou uma proposta de inserção da Teoria da

Relatividade que atenda às expectativas da sociedade e da escola e, ainda, buscando a coerência com objetivos para o ensino de Física.

O método de ensino adotado tem como núcleo a discussão, ao invés de apenas informações aos alunos. Para a apresentação da teoria da Relatividade Especial, utilizou-se a proposta de Angotti, porém, adaptando-a para as necessidades do ensino médio, já que esta foi elaborada para o ensino superior. O autor deu uma utilização maior para os aspectos históricos, sendo estes aspectos trabalhados para iniciar a problematização e, assim, a discussão do tema com os alunos. Os conteúdos foram distribuídos em módulos, os quais são sugeridos para serem trabalhados ao longo dos três anos do ensino médio. É sugerido que cada módulo seja dividido em cinco etapas; sendo a primeira etapa a contextualização histórica, apresentando um problema; na segunda etapa os alunos são divididos em grupos para discutir o problema; a terceira etapa é de apresentação das idéias de cada grupo a toda a turma; a quarta etapa é a de apresentação formal do tópico por parte do professor; e a quinta e última etapa tem como principal objetivo trazer para o cotidiano do aluno os aspectos discutidos. O autor disponibiliza um material de apoio em *CD-ROM*, dividido em 36 materiais (artigos, textos de livros, simulações e fotos), e estes 36 materiais, por sua vez, são distribuídos ao longo dos três anos do ensino médio, conforme sugerido em um quadro resumo, onde são apresentados os materiais que devem ser utilizados em cada etapa a cada ano.

Porém, o autor não apresenta resultados e nem um relato de aplicação do material em sala de aula. Outro ponto a ser discutido é que, apesar do autor disponibilizar um material de apoio com vários textos e artigos, não há um texto didático específico para os alunos. Isto se deve, provavelmente, à forma como o autor sugere que sejam trabalhados os conteúdos, ou seja, em etapas onde a primeira é a problematização. Mas consideramos de grande valia o material apresentado por Rodrigues, pois proporciona uma boa base para o professor que esteja com predisposição de incluir o ensino da teoria da Relatividade no ensino médio.

Mais recentemente encontramos a Dissertação de Castilhos [15]. Esta proposta contempla a inserção da teoria da Relatividade Especial no ensino médio na modalidade extraclasse. Para isso foi elaborado um curso introdutório à Relatividade Especial, utilizando recursos computacionais, como animações em *Flash*, a partir dos quais buscou-

se a dedução das equações matemáticas fundamentais da Relatividade Especial, para assim promover o aprendizado significativo dos alunos. A autora aplica o seu trabalho com alunos voluntários do ensino médio do Colégio Rosário de Porto Alegre. Este é outro trabalho de grande valia para o professor que pretende contemplar a teoria da Relatividade no ensino médio.

3. BASES TEÓRICAS

Utilizamos como referenciais teóricos a teoria sócio-histórica de Vygotsky e a aprendizagem significativa segundo Ausubel e Novak. A seguir descreveremos os principais conceitos destas duas teorias e suas implicações para o presente trabalho.

3.1. A importância do sócio-histórico, segundo Vygotsky

O conhecimento acumulado durante toda a existência da humanidade vem sendo repassado de geração para geração. Este conhecimento, principalmente na área da Física, veio da interação do homem com a Natureza, ou seja, da busca do entendimento da Natureza.

Nesse processo evolutivo, o homem conseguiu adaptar-se e dominar a Natureza em benefício próprio, criando, desta forma, um ambiente social de interação entre si e a Natureza.

Mas como o homem conseguiu evoluir cognitivamente?

Uma das explicações é o acúmulo do conhecimento que é transmitido de geração para geração. Então, como o homem conseguiu transmitir e principalmente adquirir os conhecimentos já existentes?

A resposta para este questionamento pode estar na teoria de aprendizagem de Vygotsky [49], denominada sócio-interacionista. Segundo esta teoria, a aquisição do conhecimento está na interação social do homem. A proeminência da teoria está no entendimento de como as interações sociais agem na formação dos processos mentais superiores do indivíduo (pensamento, linguagem, comportamento volitivo).

Vygotsky foi um teórico que nasceu no final do século XIX, vivendo até meados da década de trinta, do século passado, em uma situação social, política e científica completamente diversa da nossa.

O momento vivido por este teórico, na Rússia pós-Revolução, influenciado pelo pensamento marxista, contribuiu para definir as idéias às quais se dedicou, principalmente sobre o desenvolvimento do indivíduo e da espécie humana, ao longo do processo sócio-histórico.

Segundo esta teoria, a evolução que observamos em cada ser humano não é um processo que ocorre naturalmente, mas sim um processo social, mediado através da interação com o ambiente, instrumentos e outras pessoas.

É importante salientar que todo o desenvolvimento cognitivo de uma pessoa parte das relações sociais e, através da mediação, converte-se em funções psicológicas.

O ser humano distingue-se radicalmente dos animais quanto ao seu funcionamento psicológico, pois apesar destas características não serem transmitidas por hereditariedade e nem adquiridas passivamente pela pressão externa do ambiente, são adquiridas ao longo da vida através da interação do homem com o seu meio físico e social. Diferentemente, o animal não transmite a sua experiência e nem assimila a experiência alheia. Muito menos é capaz de transmitir ou aprender a experiência das gerações anteriores. Sendo assim, as fontes de comportamento, nos animais, são muito limitadas, prevalecendo o comportamento instintivo e inato e a experiência imediata e individual, responsável pela variação do comportamento.

Conforme Rego [34], que cita Leoniev, a respeito da importância da possibilidade de apropriação da cultura elaborada pelas gerações presentes: *“Cada individuo aprende a ser um homem. O que a natureza lhe dá quando nasce não lhe basta para viver em sociedade. É-lhe ainda preciso adquirir o que foi alcançado no decurso do desenvolvimento histórico da sociedade humana”*.

A teoria de Vygotsky não está fundamentada no indivíduo nem no meio social em que o homem vive, mas sim na interação deste com o meio social.

É importante ressaltar que, ainda segundo Rego, na abordagem vygotskiana o que ocorre não é um somatório entre fatores inatos e adquiridos e sim uma interação dialética que se dá, desde o nascimento, com o meio social no qual se insere o indivíduo. Vygotsky [49] também rejeita os modelos pressupostos inatistas que pré-escrevem características comportamentais universais do ser humano, atrelando as determinações de sua estrutura biológica e de sua conjuntura histórica.

Passaremos, a seguir, a analisar alguns aspectos da teoria vygotskiana que têm implicações para a aprendizagem e o ensino.

3.1.1. *Mediação, instrumentos e signos*

Um conceito central para a compreensão da teoria de Vygotsky sobre o funcionamento psicológico é o conceito de mediação que, segundo Oliveira [29], é o processo de intervenção de um elemento intermediário, numa relação; a relação deixa de ser direta e passa a ser mediada por esse elemento.

De acordo com Vygotsky, a relação do homem com o mundo não é direta, mas, fundamentalmente, uma relação mediada. As funções psicológicas superiores apresentam uma estrutura tal que entre o homem e o mundo existem ferramentas mediadoras auxiliares nas atividades humanas.

A mediação, para Vygotsky, constitui um processo de intervenção de elementos sócio-históricos nas relações entre o sujeito e o mundo: ele abandona a idéia de que a experiência no mundo não necessita de mediações (idéia que supõe que basta estar no mundo para interagir com ele, independentemente de fatores de ordem cultural) e entende que esta relação, entre o sujeito e o mundo, passa a ser mediada por elementos, tais como instrumentos e signo. Embora haja uma analogia entre eles, devemos tratá-los separadamente pois possuem características diferentes.

Os instrumentos são elementos interpostos entre o trabalhador e o objeto de seu trabalho, ampliando as possibilidades de transformação da natureza. Podemos utilizar como exemplo a caça onde o uso de uma flecha permite o alcance de um animal. Diferentemente dos animais, o homem produz instrumentos para a realização de tarefas para uso imediato ou posterior, assim como preserva o instrumento ou o repassa para gerações a sua utilidade e seu aperfeiçoamento. É importante ressaltar que os animais também utilizam instrumentos, porém de forma rudimentar. Os animais, diferentemente do homem, não produzem instrumentos deliberadamente, instrumentos com fins específicos.

Já os signos regulam as ações sobre o psiquismo das pessoas. Os signos, chamados por Vygotsky de “instrumentos psicológicos”, são orientados para o próprio sujeito, para dentro do indivíduo.

Segundo Moreira [26], um instrumento é algo para fazer alguma coisa e o signo é algo que significa alguma coisa e pode ser classificado em três tipos: *Indicadores*, são os signos que possuem alguma relação de causa e efeito com aquilo que significa; os *Icônicos*

que são o desenho ou a imagem do que significa; os *Simbólicos* que possuem relação abstrata com aquilo que significam, como por exemplo, a palavra e a escrita.

Podemos concluir que instrumentos e signos são construções sócio-históricas e culturais, e que através da internalização destas constituições sociais o sujeito se desenvolve cognitivamente.

Um dos mais importantes signos é a fala. Ao aprender a usar a linguagem, para ação futura, a criança começa a ir além das experiências imediatas. Sendo assim, permite que se realizem operações bem mais complexas como prever, comparar e deduzir.

Para Vygotsky, a principal função da linguagem é a de intercâmbio social, ou seja, é para se comunicar com seus semelhantes que o homem cria e utiliza os sistemas de linguagem.

Para comunicar-se com outra pessoa é necessário que sejam utilizados signos, compreensíveis por esta pessoa, que traduzam idéias, sentimentos, vontades, pensamentos de forma bastante precisa.

3.1.2. Níveis de desenvolvimento psicológico

Vygotsky caracteriza o desenvolvimento psicológico em dois tipos: um é o que já se aprendeu e o outro é o que se pode aprender.

O primeiro é denominado por Vygotsky de *nível de desenvolvimento real*, ou seja, o nível de desenvolvimento mental que já se estabeleceu como certo, desenvolvido e já completado. Pode ser identificado através dos problemas que os alunos já conseguem resolver sozinhos, sem ajuda de um adulto ou de outro aluno mais experiente. Este nível indica os processos mentais dos alunos que já se estabeleceram, ciclos de desenvolvimento que já se completaram.

Costuma-se avaliar nas escolas somente o nível de desenvolvimento real do aluno, isto é, considera-se que somente aquilo que ele é capaz de realizar sem a colaboração de outros seja representativo do seu desenvolvimento.

O segundo, o *nível de desenvolvimento potencial* é aquilo que a criança (aluno) é capaz de realizar com a ajuda de outras pessoas mais capazes. Nesse caso, realiza tarefas e soluciona problemas através de diálogos, da colaboração e da imitação.

Vygotsky denomina de *zona de desenvolvimento proximal* a interface entre o nível de desenvolvimento real e o nível de desenvolvimento potencial, caracterizado pela solução de problemas sob orientação de um adulto (professor) ou em colaboração com companheiros mais capazes. Então, a zona de desenvolvimento proximal, caracteriza-se por funções que ainda não amadureceram, que estão em processo de maturação, o que Vygotsky denomina de brotos ou flores do desenvolvimento mental.

Conforme Rego [34], *O conhecimento da zona de desenvolvimento proximal é de extrema importância para as pesquisas do desenvolvimento infantil e para o plano educacional, justamente porque permite a compreensão da dinâmica interna do desenvolvimento individual.*

E acrescenta:

Através da zona de desenvolvimento proximal, é possível verificar não somente os ciclos já completados, como também os que estão em formação, o que permite o delineamento da competência da criança (aluno) e de suas futuras conquistas, assim como elaboração de estratégias pedagógicas que a auxiliem nesse processo.

A seguir faremos um breve comentário das implicações da teoria de Vygotsky para a educação.

3.1.3. As implicações pedagógicas da teoria de Vygotsky

A obra de Vygotsky pode significar uma grande contribuição para a área da educação, pois traz importantes reflexões sobre o pensamento e a formação das características psicológicas. No entanto, é importante ressaltar que não é possível encontrar soluções práticas ou instrumentos metodológicos de imediata aplicação na prática educativa do cotidiano.

Vygotsky, para explicar o papel da escola no processo de desenvolvimento do indivíduo, faz uma distinção entre os conceitos: conhecimentos já construídos na experiência pessoal, concreta e cotidiana dos alunos ele chama de conceitos cotidianos ou espontâneos, e aqueles que são adquiridos em sala de aula, por meio de um ensino sistemático, ele chama de conceitos científicos.

Os conceitos cotidianos referem-se àqueles construídos a partir da observação, manipulação e vivência do aluno. Já os conceitos científicos relacionam-se àqueles que não são diretamente acessíveis à observação ou ação direta do aluno, são os conhecimentos adquiridos nas interações escolares.

Conforme Oliveira [29], a implicação da concepção de Vygotsky para o ensino escolar é imediata. Se o aprendizado impulsiona o desenvolvimento, então a escola tem um papel essencial na construção do ser psicológico adulto dos indivíduos que vivem em sociedades escolarizadas. Mas, o desempenho desse papel só se dará adequadamente quando conhecermos o nível de desenvolvimento dos alunos, para assim a escola dirigir o ensino não para etapas intelectuais já atingidas, mas sim para estágios ainda em desenvolvimento.

Dentro desta linha, Vygotsky [49] descreve: *“a noção de zona de desenvolvimento proximal capacita-nos a propor uma nova fórmula, a de que o “bom aprendizado” é somente aquele que se adianta ao desenvolvimento.”*

Vygotsky acrescenta:

“aprendizado não é desenvolvimento; entretanto, o aprendizado adequadamente organizado resulta em desenvolvimento que, de outra forma, seria impossível de acontecer. Assim, o aprendizado é um aspecto necessário e universal do processo de desenvolvimento das funções culturalmente organizadas e especificamente humanas.”

O papel do professor é fundamental, pois este serve de mediador do aprendiz com o novo conhecimento. Ele deve atuar dentro da zona de desenvolvimento proximal do aluno, ou seja, ele deve buscar conhecer a zona de desenvolvimento real. Neste contexto, a linguagem é o mais importante dos signos para o desenvolvimento do cognitivo do aluno.

Conforme Moreira [26], o professor é responsável pelo significado que o aluno captou, analisando se este é aceito e compartilhado socialmente. A responsabilidade do aluno é verificar se os significados que captou são aqueles que o professor pretendia que ele captasse e se são compartilhados no contexto da área de conhecimento em questão. Enfim, o ensino se consuma quando aluno e professor compartilham conhecimentos.

Segundo essa teoria é necessário que professor e alunos dialoguem, falem durante o processo de ensino. É preciso que os alunos trabalhem em grupos para que os aprendizes mais capazes possam auxiliar os outros.

Desta forma, as atividades propostas pelo professor devem ser bem elaboradas, a fim de levar o aluno a raciocinar, usando o que ele já sabe e ao mesmo tempo exigindo um nível de abstração maior. A repetição nada acrescenta ao conhecimento já apropriado ou elaborado pelo aluno. Por outro lado, tentar forçar o aluno a trabalhar questões com as quais não tenha nenhuma familiaridade, causa rejeição e dificuldade.

Podemos concluir que sem a interação social, a troca de conhecimento, dentro da zona de desenvolvimento proximal do aluno, não há como ocorrer aprendizado e, por conseguinte, não há evolução do cognitivo do aluno. Moreira [26] afirma: “*interação e intercâmbio implicam, necessariamente, que todos os envolvidos no processo ensino-aprendizagem devam falar e tenham oportunidade de falar.*”

Porém, é importante ressaltar que a frequência do aluno à escola não garante aprendizado para a apropriação do acervo de conhecimentos sobre as áreas básicas daquilo que foi elaborado por seu grupo social. O acesso ao conhecimento passa também por outros fatores como de ordem econômica e política. Com isso, o pensamento de Vygotsky implica uma análise mais ampla por parte do professor para que se possa conhecer a zona de desenvolvimento proximal do aprendiz.

3.1.4. *Implicações da teoria de Vygotsky para a proposta*

Podemos caracterizar o conteúdo da proposta como de conceitos científicos segundo a teoria de Vygotsky [49]. Isto porque, para os alunos em sua interação com o meio social de seu cotidiano, os conceitos da teoria da Relatividade Especial não são percebidos, isto porque as velocidades às quais estamos acostumados são muito pequenas frente à velocidade da luz.

O primeiro passo para a aplicação da proposta foi o de avaliar o nível de desenvolvimento real dos alunos, através de um questionário (Apêndice 3), aplicado antes da proposta propriamente dita.

O material didático é melhor aproveitado por alunos que estão mais ao final do ensino médio, pois consideramos que nesta fase este material didático encontra-se mais bem encaixado zona de desenvolvimento proximal.

O professor tem papel fundamental na aplicação do material didático, porque ele servirá como mediador entre o conhecimento já existente e os novos conceitos. O aluno tem potencial para absorver os conceitos da Relatividade Especial, mas é necessário o auxílio do professor para a compreensão de muitos dos conceitos inusitados desta teoria.

O material inicia apresentando uma parte histórica da evolução do conhecimento humano até a elaboração da teoria da Relatividade Especial. Esta evolução somente ocorreu devido à interação social e à transmissão do conhecimento de uma geração para outra.

E, finalmente, o que consideramos um dos pontos mais importantes durante a aplicação do material foi a interação professor-aluno através da fala. Para que ocorresse aprendizagem, foi importante o diálogo entre professor e alunos, não sendo apenas uma fala unidirecional por parte do professor.

3.2. Aprendizagem significativa de Ausubel

A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel [4] focaliza primordialmente a aprendizagem cognitiva, ou seja, é uma aprendizagem que resulta no armazenamento organizado de informações na mente do ser que aprende.

Ausubel, sendo cognitivista, sugere uma explicação teórica para o processo de aprendizagem. Para ele, aprendizagem significa organização e interação do material na estrutura cognitiva do aprendiz.

Segundo esta teoria, o fato mais importante para o aprendizado, além da disposição do aluno em aprender, é “aquilo que o aluno já sabe”. Assim sendo, cabe ao professor identificar no aluno o que ele já conhece, para construir o novo conhecimento.

Para Ausubel, o aprendizado somente será significativo quando os novos conceitos relacionarem-se com as informações que o aluno já possui, os conhecimentos prévios, os quais ele denomina de conceitos subsunçores.

Mesmo sendo alunos de uma mesma turma, estes não terão subsunçores iguais, ou seja, existem subsunçores que podem ser abrangentes e bem desenvolvidos ou limitados e pouco desenvolvidos, dependendo da frequência com que a aprendizagem significativa ocorra no sujeito.

A aprendizagem será significativa quando o novo conceito se ancorar nos conhecimentos prévios (subsunçores). Caso o novo conceito não se relacione com os subsunçores que o aprendiz possui, ou seja, sem que ocorra qualquer interação com os conceitos relevantes, existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, teremos o que Ausubel classifica como aprendizado mecânico.

Para que ocorra a aprendizagem significativa, o conteúdo a ser aprendido terá de ser *potencialmente significativo*. Um conteúdo, para que seja potencialmente significativo, terá que se relacionar com a estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não-arbitrária e não-literal.

Caso o professor deseje desenvolver um determinado conteúdo que não seja potencialmente significativo, Ausubel recomenda a utilização de organizadores prévios, os quais servirão de âncora para o desenvolvimento do novo conteúdo. De acordo com Moreira [26], organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido propriamente e têm a função de servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que ele deve vir a saber, ou seja, organizadores prévios são pontes cognitivas.

Ausubel ainda propõe a teoria da assimilação que é um processo que ocorre quando um conceito, potencialmente significativo, é assimilado sob uma idéia ou conceito mais incluso já existente na estrutura cognitiva do aluno. Sendo assim, não só o conceito novo é modificado pela interação, o subsunçor já existente, também sofre modificação.

3.3. A teoria de educação de Novak

Joseph D. Novak [28] deu continuidade ao trabalho de Ausubel, quando este praticamente abandonou o trabalho sobre psicologia educacional. Assim sendo, poderíamos chamar de teoria de aprendizagem significativa de Ausubel e Novak, ao invés de apenas teoria de aprendizagem significativa de Ausubel.

A teoria de educação de Novak é fundamentada a partir das idéias da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, porém é mais abrangente, pois busca a integração entre pensamento e sentimentos. Esta teoria parte da idéia de que a educação é o conjunto

de experiências cognitivas, afetivas e psicomotoras que colaboraram para o engrandecimento do ser humano para lidar com a vida diária.

A teoria de educação de Novak considera que os seres humanos fazem três coisas que envolvem um conjunto de experiências cognitivas: pensar, sentir e atuar. Qualquer evento educativo é uma ação de troca de significados e sentimentos entre professor e aprendiz.

Novak reintroduziu e ampliou a idéia de lugares comuns originalmente proposta por Schwab [41]. Qualquer fenômeno educativo, segundo Schwab, envolve quatro elementos, aos quais denominou de lugares comuns, que são *aprendizagem, ensino, currículo e contexto*. Novak, além dos quatro elementos anteriores, acrescentou a *avaliação*, que está sempre presente nos eventos educacionais e passou a chamar, ao invés de lugares comuns da educação, de elementos da educação. Então, os cinco elementos de Novak são: *aprendiz, professor, conhecimento, contexto e avaliação*.

De acordo com Moreira [27], estes cinco elementos, que são fundamentais para a teoria de Novak, contêm a idéia de que qualquer evento educativo implica uma *ação* para *trocar significados e sentimentos* entre o professor e o aluno, tendo como principal objetivo a aprendizagem significativa, por parte do aprendiz, do novo conceito contextualmente aceito. O professor, ao ensinar, apresenta conteúdos que são aceitos e válidos em um determinado contexto social.

Logo, para a teoria de educação de Novak, temos alguém que aprende (aprendiz) alguma coisa (conhecimento) com alguma pessoa que já conhece estes conceitos (professor), em certo contexto social (contexto), e é avaliado, pois muito do que acontece na vida das pessoas depende da avaliação.

A avaliação da aprendizagem do aluno e do desempenho do professor, em qualquer evento educativo, é fundamental, pois através dela temos condições de definir novos rumos a serem tomados e quais as melhores estratégias para a aprendizagem significativa. Sendo assim, a avaliação envolve todo o processo de educação. O aluno deve ser avaliado e se auto-avaliar.

A aprendizagem significativa também é o conceito chave da teoria de educação de Novak. O novo conhecimento interage com o conhecimento prévio; o novo conhecimento adquire significados e o prévio se torna mais elaborado.

Mas, segundo Moreira [27], é importante deixar bem claro que aprendizagem significativa não é sinônimo de aprendizagem correta, pois o aluno pode aprender de maneira significativa, porém errada, ou seja, o aluno adquire significados que não são compartilhados pela comunidade.

Os conhecimentos adquiridos por aprendizagem significativa são muito resistentes à mudança.

Para Novak [28], assim como para Ausubel [4], para que ocorra a aprendizagem significativa é necessário que:

- os alunos estejam pré-dispostos a aprender;
- que o material a ser ensinado seja potencialmente significativo, ou seja, o material deve se relacionar com os conhecimentos prévios dos alunos;
- os alunos possuam conhecimento relevante, ou seja, subsunçores.

Enfim, a aprendizagem significativa de Novak é centro integrador dos cinco elementos de educação, bem como de pensamentos, sentimentos e ações.

A seguir passaremos a descrever algumas implicações das teorias de Ausubel e Novak para a presente proposta.

3.4. Implicações das teorias de Ausubel e Novak para a proposta

Considerando a aprendizagem significativa, procuramos elaborar um texto que leve o aluno a construir, a partir da Relatividade galileana, um edifício bem alicerçado de conhecimentos. Acreditamos ser possível apresentar um material que se relacione com a estrutura cognitiva do nosso aluno, ancorando o novo conhecimento no já existente e transformando o cognitivo do aluno.

O professor desempenha uma função, segundo a perspectiva de Ausubel [4], de extrema relevância para o aprendizado do aluno e, para Novak [28], é um dos elementos fundamentais no processo educacional. Uma de suas atribuições é a de identificar a estrutura da matéria de ensino, localizando conceitos unificadores e abrangentes e, depois, os específicos. Após isso, identificar quais os subsunçores que o aluno precisa ter em sua estrutura cognitiva para que ocorra uma aprendizagem significativa. Caso o aluno não possua os subsunçores necessários, o professor terá de utilizar organizadores prévios. E,

finalmente, desenvolver o novo conteúdo utilizando recursos que possibilitem a aprendizagem significativa.

Com certeza, é fundamental que o professor busque identificar quais são os subsunçores existentes, para que o conteúdo que se pretende desenvolver seja potencialmente significativo. Caso este ainda não seja potencialmente significativo, deve utilizar os organizadores prévios para tornar estes conteúdos potencialmente significativos.

Considerando o exposto acima, o primeiro passo para o desenvolvimento do projeto foi a aplicação de um questionário para identificar a existência de alguns conhecimentos prévios, como por exemplo: referencial inercial. Em seguida analisamos todos os questionários, buscando interpretar quais eram os conhecimentos existentes em cada aluno e identificar se existiria a necessidade de se desenvolver algum organizador prévio. Dentro desta análise, identificamos que grande parte dos alunos desconhecia o conceito de referencial inercial, fundamental para o desenvolvimento da teoria da Relatividade Especial. Também foi possível identificar que existia uma crença muito forte, principalmente por parte dos alunos da Escola Farroupilha, da existência de um método científico. Com esta análise, buscamos elaborar organizadores prévios para que os conceitos da Relatividade Especial pudesse se ancorar.

Torna-se bastante difícil a identificação dos subsunçores, de forma individual, devido ao número de alunos em cada turma. Assim, ao elaboramos os organizadores prévios, buscamos dar uma abrangência geral, para nivelar aos conhecimentos mínimos para o aprendizado da Relatividade Especial. Desta forma, alunos que já possuíam estes conhecimentos e que poderiam explorar outros novos conhecimentos, ficaram prejudicados. Mas isto foi necessário para tornar o material potencialmente significativo a todos os alunos.

Segundo Moreira [26], quando o aluno chega à escola, ele já possui, em sua estrutura cognitiva, concepções alternativas que são frutos de aprendizagens significativas na sua interação com o meio em que vive. Porém, muitas destas concepções que fazem parte do senso comum, não são as aceitas no contexto da matéria de ensino e são fortes e muito resistentes a mudanças. Podemos citar, como exemplo, a idéia de que dois eventos que são simultâneos em um local obrigatoriamente também terão que ser simultâneos em outro local. Ou a dificuldade de aceitar que o tempo não é mais algo absoluto e sim relativo. Este conceito, quando se ensina Relatividade Especial, talvez seja um dos mais

difíceis de mudarmos junto ao subsunçor do aluno, pois em seu cotidiano não percebe tais alterações em intervalos de tempo.

Ao professor cabe analisar diariamente, na medida do possível, a aprendizagem de seus alunos, acompanhando-os na construção de seus conhecimentos, verificado se a aprendizagem significativa dos alunos possui os significados aceitos pela comunidade.

Enfim, se o aluno não estiver predisposto a aprender, por mais que o professor se esforce, isto será em vão. Acreditamos que se o professor tiver um bom relacionamento com seu aluno, ou seja, se possuir um relacionamento afetivo, aproximando-se deste, poderá conquistar a disposição do aluno para a aprendizagem. Assim, qualquer evento educativo é uma ação de troca de significados e sentimentos entre professor e aprendiz.

4. ELABORAÇÃO DO PRODUTO

A elaboração do produto deste projeto constou de duas etapas: a elaboração do texto dos alunos e a elaboração do material didático para os professores. A seguir, passaremos a descrever as principais etapas e o porquê da escolha de algumas ênfases.

4.1. Elaboração do texto dos alunos

Duas ênfases principais foram dadas na elaboração do texto dos alunos. A primeira foi sobre a evolução do conhecimento científico, enquanto que a segunda foi sobre a parte conceitual da teoria da Relatividade Especial.

Na abordagem histórica, procuramos demonstrar principalmente que a ciência possui uma linha contínua de evolução a que está intimamente ligada, ou seja, para que se desenvolvam novas teorias é necessário que se conheçam as teorias já existentes.

Iniciamos o texto descrevendo o paradoxo de Zenão, onde utilizamos como fonte de referência o artigo de Bassalo [6]. Achamos importante introduzir este paradoxo para evidenciar aos alunos que a busca pelo entendimento dos movimentos relativos dos corpos existe há mais de 2500 anos.

Logo em seguida, apresentamos as principais idéias e influências de Aristóteles, as quais foram fundamentais para o entendimento da evolução do conhecimento. Quando falamos em história da ciência, não temos como deixar de lado as idéias deste filósofo, que influenciou e preponderou até o século XVI.

Em seguida passamos a descrever a relatividade dos movimentos dos corpos, na visão de Galileu e Newton, buscando enfocar a mudança que começou a ocorrer na forma de se fazer ciência, que esta deixou de ser somente filosófica e passou a ser mais experimental e matemática. Nesta fase, apresentamos as transformações de Galileu e Newton para a relatividade do movimento dos corpos. Procuramos resgatar, junto aos alunos, a importância da adoção do referencial e a identificação dos referenciais inerciais. Logo após, descrevemos alguns fatos da mecânica que achamos importantes para a construção do conhecimento da teoria da Relatividade Especial.

Dando seqüência, passamos a relatar alguns fatos do progresso do saber do Eletromagnetismo. Iniciamos descrevendo os primeiros relatos da percepção dos fenômenos elétricos e magnéticos, que ocorreram na Grécia, quando ainda não se diferenciavam estes dois campos do conhecimento. Feito isso, passamos a relatar os principais fatos, tanto da Eletricidade, quanto do Magnetismo, a partir de Gilbert (1600) até o início da unificação com as observações de Oersted. Enfatizamos as principais descobertas, mas tendo como principal objetivo a unificação da Eletricidade e do Magnetismo e as suas conseqüências, como a teoria da Relatividade Especial.

Após a unificação da Eletricidade com o Magnetismo, no Eletromagnetismo, passamos a apresentar os paradoxos surgidos com essa unificação. Dentre eles destacamos o problema do éter e a busca para sua detecção, bem como o paradoxo dos resultados conflitantes das equações de Maxwell ao utilizar as transformações de Galileu.

Einstein buscou resolver o paradoxo que consistia em que ao passarmos de um referencial inercial para outro, utilizando as transformações galileanas, para um mesmo fenômeno, as equações de Maxwell forneciam resultados diferentes em cada referencial. Tratamos este ponto de maneira qualitativa.

Para esta primeira parte, a histórica, baseamo-nos nos seguintes autores: Arruda [3], Cajori [13], Bassalo [6], Gaspar [19], Hellman [22], Martins [25], Rocha [37], Thuillier [46].

Na parte conceitual, foram abordados os conceitos que julgamos fundamentais e possíveis de serem desenvolvidos com alunos do ensino médio. Esses conceitos foram: postulados da Relatividade Especial, simultaneidade, dilatação temporal, contração do espaço, adição de velocidades e energia relativística.

Os postulados foram apresentados como uma conseqüência do desenvolvimento científico da época. Achamos essencial que se fizesse algum comentário sobre as conseqüências dos dois postulados.

Como conseqüência direta dos postulados, em especial o segundo, a noção de simultaneidade foi modificada, deixando de ser absoluta. Para uma melhor compreensão deste conceito usamos uma figura, para ilustrar a simultaneidade de dois eventos. Esta figura encontra-se no Capítulo 3 do texto dos alunos, *Relatividade da simultaneidade*, figura 7. Consideramos este conceito fundamental para o desenvolvimento da Relatividade

Especial por ser o único perceptível pelos nossos alunos. Como exemplo, podemos citar a diferença entre intervalos de tempo de uma programação enviada via satélite.

A dilatação temporal foi apresentada como uma consequência do segundo postulado. Para a compreensão deste conceito, achamos conveniente realizar a dedução da equação (11) do texto dos alunos, através da experiência de pensamento do trem que se encontra no Capítulo 4, do mesmo texto.

A contração do espaço foi apresentada também como uma consequência dos postulados. Assim como na dilatação temporal, realizamos a dedução da equação (14) do texto dos alunos, que se refere à contração do espaço. Buscamos enfatizar que a contração ocorre na mesma direção do deslocamento, tratando-se de uma contração real, mas não material. Ela ocorre no espaço (medido) e não no objeto em movimento, diferentemente da interpretação dada por Lorentz e FitzGerald. Achamos conveniente apresentar um tópico descrevendo a diferença entre a interpretação dada por estes autores e aquela dada por Einstein. Este tópico encontra-se na seção 5.1.

Consideramos fundamental no ensino da Relatividade Especial o tópico de adição de velocidades, pois temos que abandonar a relatividade galileana para que os postulados de Einstein sejam atendidos. Iniciamos este tópico lembrando a Relatividade galileana, utilizando um exemplo onde a velocidade relativa entre dois corpos é maior que a velocidade da luz, estando desta forma em desacordo com o segundo postulado.

Com a Relatividade Especial, o conceito de energia passou a ser mais abrangente, pois massa e energia passam a ser equivalentes. Não nos detivemos em demonstrar a dedução da equação da energia relativística (equação (21) do texto dos alunos), pois estávamos mais preocupados com a interpretação do princípio da equivalência massa-energia. Dentre os exercícios deste tópico, destacamos o de número 26 que solicita que a partir da relação da energia relativística se comprove a impossibilidade de um corpo atingir a velocidade da luz. Cuidado especial foi tomado no tratamento sobre a impossibilidade de uma partícula massiva ser acelerada até a velocidade da luz.

Tivemos o cuidado de enfatizar a visão de que tal impossibilidade é devida à necessidade de se ter uma quantidade infinita de energia, diferente da visão de muitos autores, que consideram o conceito de massa relativística. Podemos citar Serway e Jewett [44]: *Alguns tratamentos mais antigos da relatividade apresentavam o princípio de conservação do momento a altas velocidades utilizando um modelo no qual a massa de*

uma partícula aumenta com a velocidade. Você pode ainda encontrar essa noção de “massa relativística” em suas leituras extras, especialmente em livros mais antigos. Esteja ciente de que essa noção não é mais aceita amplamente, e que a massa é considerada como invariante, independentemente da velocidade. A massa de um corpo em todos os referenciais é considerada como aquela medida por um observador em repouso em relação ao corpo.

Dentre tantos paradoxos que surgiram com a Relatividade Especial, o paradoxo dos gêmeos talvez seja o mais conhecido. Assim, achamos apropriado dedicarmos um capítulo para o desenvolvimento deste tópico. Buscamos enfatizar que a solução do paradoxo não pode ser dada por conceitos da Relatividade Especial.

E, para encerramento da abordagem conceitual da Relatividade Especial, comentamos rapidamente a idéia da Relatividade Geral. Tivemos como principal objetivo deste capítulo instigar o aluno para que tivesse a idéia, mesmo que superficial, do que se trata a Relatividade Especial.

Para a elaboração da abordagem conceitual do texto dos alunos tivemos como base os seguintes autores: Barnett [5], Chesman et al [16], Einstein [18], Torres [47], Gaspar [19], Halliday et al [21], Landau e Rumer [24], Ostermann e Ricci [30] e [31], Resnick [35], Ricci [36] e Sawicki [40].

O texto dos alunos encontra-se no apêndice A.

4.2. Elaboração do texto dos professores

O material dos professores foi elaborado somente após a aplicação do texto dos alunos, isto para que se pudesse verificar quais deveriam ser as ênfases a serem dadas.

Tivemos o cuidado de optar por uma abordagem que busque a interação entre professor e aluno, estimulando os professores para que identifiquem os conhecimentos que seus alunos possuem (subsunçores) e verificando se estes são suficientes para que se tenha uma aprendizagem significativa, contemplando, dessa forma, as teorias de aprendizagem de Vygostky, Ausubel e Novak.

De acordo com a nossa experiência na aplicação do material com os alunos, dividimos o material dos professores em tópicos e sugerimos o número de aulas que

consideramos suficiente para o desenvolvimento de cada um deles. Então, para cada um dos tópicos iniciamos apresentando quais são os objetivos a serem alcançados, além de comentários pertinentes. Também, sugerimos os exercícios a serem resolvidos em cada aula. Como cada tópico do texto dos alunos possui alguns exercícios, colocamos no material dos professores as respostas a estas questões.

Para os tópicos históricos, buscamos apresentar ao professor uma maneira de trabalho que o faça levar seus alunos a perceberem que a ciência evolui de maneira contínua e que é necessário possuir o conhecimento anterior para que se possa desenvolver o novo conhecimento. Além disso, buscamos apresentar o fato de que a teoria da Relatividade Especial foi elaborada a partir de problemas surgidos com a teoria Eletromagnética.

Os tópicos referentes à abordagem conceitual, presentes no material dos professores, sugerem que seja necessária uma abordagem para que ocorra uma mudança conceitual junto aos alunos, principalmente nas idéias de espaço e tempo. Dentre os principais enfoques que abordamos no texto dos professores, consta o de que estes desenvolvam, com os alunos, além das mudanças ocorridas com os conceitos de espaço e tempo, também a interpretação dada por Einstein para a contração do comprimento, comparando-a com a interpretação dada por FitzGerald.

Aqui, como no texto dos alunos, preocupamo-nos em tratar com cuidado a questão da impossibilidade de se acelerar uma partícula massiva até a velocidade da luz.

Ainda neste texto, sugerimos algumas referências bibliográficas para aprofundamento no conhecimento da teoria da Relatividade Especial, como por exemplo, a indicação da obra de Ricci [36] e o *site* do Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos [39].

Além das referências já citadas anteriormente (texto dos alunos), também utilizamos Terrazam [45] para a elaboração do texto dos professores.

O material didático encontra-se no apêndice B.

5. APLICAÇÃO DA PROPOSTA

5.1. Descrição da aplicação do material em sala de aula

O texto dos alunos foi aplicado em três turmas diferentes, sendo duas de escola pública, Escola Técnica Municipal Farroupilha, e uma turma de escola particular, Colégio Cenecista Carlos Maximiliano, totalizando 87 alunos concluintes do ensino médio.

Além do texto dos alunos, que fora disponibilizado a todos e que se encontra no apêndice A, as aulas foram ministradas com a utilização do *software* de apresentação *PowerPoint*. Como nenhuma das duas escolas possuía projetor, foi utilizada uma conexão do computador com a televisão. Desta forma, procurou-se deixar a aula um pouco mais dinâmica e atrativa.

Também deu-se muita importância ao debate em aula, partindo do texto dos alunos, pois estas foram as principais formas de aquisição dos conceitos da Relatividade Especial. Desta maneira, pudemos observar a relevância que a teoria sócio-interacionista de Vygotsky possui para o aprendizado. Para o conteúdo, como é o caso da Relatividade Especial, que se encontrava na zona de desenvolvimento proximal, a possibilidade da troca de informações com o professor foi extremamente importante para esses alunos.

O desenvolvimento do projeto teve início no dia 15 de outubro de 2004 com a turma do Colégio Maximiliano, seguida pelas duas turmas da Escola Farroupilha, iniciando em 20 de outubro. As aulas estenderam-se por praticamente um mês e meio, totalizando 20 horas-aulas em cada turma. A aplicação do projeto deu-se até 23 de novembro na Escola Farroupilha e até 02 de dezembro no Colégio Carlos Maximiliano. É importante ressaltar que a carga horária da disciplina de Física na Escola Farroupilha corresponde a três aulas semanais e, no Colégio Maximiliano, apenas duas na semana. Por este motivo, o início do trabalho ocorreu na segunda escola, sendo esta também a última a terminar a aplicação do material.

A seguir, faremos uma descrição do desenvolvimento dos principais tópicos do projeto.

5.1.1. Tópico: *pensamento aristotélico e Relatividade galileana*

Neste tópico abordamos a Seção 2.1, *A Relatividade galileana*. Começamos ilustrando o paradoxo de Zenão, relacionado com a velocidade relativa dos corpos. Trabalhamos o paradoxo, demonstrando que a relatividade dos movimentos depende do referencial adotado, aproveitando o momento para demonstrar a importância da adoção de referenciais.

O pensamento aristotélico foi apresentado e verificamos que muitos alunos ainda possuem esta forma de pensar. O principal enfoque que foi dado é o de que a forma como Aristóteles concebia a Natureza era puramente filosófica, ou seja, não utilizava argumentos experimentais ou matemáticos. Como exemplo, citamos a maneira como Aristóteles apresentava a matéria, composta de quatro elementos: fogo, ar, água e terra. Estes elementos tinham posições determinadas no Universo, chamadas lugares naturais. Ressaltamos que o pensamento aristotélico permaneceu sem contestação mais veemente até o século XVI, principalmente por influência da Igreja.

Neste contexto histórico, apresentamos aos alunos que o pensamento filosófico aristotélico começou a ser deixado de lado, principalmente, a partir de Galileu. A forma como este passou a fazer ciência foi mais matemática e experimental. Neste momento, salientamos que não existe um “método científico” rigoroso, a ser seguido fielmente, pois muitos alunos acreditavam em sua existência.

Na Relatividade galileana enfocamos principalmente o fato de que tempo e espaço são independentes um do outro, tendo como consequência a simultaneidade absoluta de eventos. Neste momento, proporcionamos um debate com os alunos, cujo principal enfoque foi demonstrar que isto está de acordo com o nosso cotidiano, ou melhor, da forma como analisamos a Natureza. Citamos como exemplo dois relógios que estejam ajustados, registrando a mesma hora, que continuarão a registrar a mesma hora independente de seu estado de movimento ou repouso. Se não fosse assim, teríamos que frequentemente ajustar os nossos relógios.

Outro ponto importante para a compreensão da Relatividade Especial é saber definir corretamente referenciais inerciais. Utilizamos parte da terceira aula para recapitular este conceito. Citamos alguns exemplos de referenciais inerciais, destacando que não há um referencial inercial absoluto. Utilizamos o trecho que se encontra na Seção

2.1 do texto dos alunos, do filósofo John Locke, para ilustrar a importância da adoção correta do referencial inercial. Fizemos uma leitura desta passagem, solicitando que contribuíssem com comentários a respeito. Um dos comentários feito por aluno diz que o “trecho” *queria dizer a mesma coisa, que quando estamos andando de carro e avistamos outro à nossa frente, deslocando-se com a mesma velocidade, para nós, que estamos dentro do carro (atrás), temos a sensação de que este não está em movimento (carro da frente), mas quem está fora do carro perceberá que os dois carros estão em movimento.*

Foi solicitado ainda aos alunos que fizessem os exercícios dois, três e quatro para serem corrigidos na aula seguinte.

Para o desenvolvimento deste tópico foram necessárias três aulas.

5.1.2. Tópico: Isaac Newton e movimento relativo dos corpos

Iniciamos este tópico descrevendo a importância da vida de Isaac Newton, um dos maiores cientistas de todos os tempos, destacando que este estudioso elaborou suas leis partindo do conhecimento existente em sua época. Evidenciamos ainda uma das frases ditas por Newton a respeito de seu trabalho, quando referia-se ao fato de que se enxergava longe era porque estava sobre ombros de gigantes.

Objetivamos, principalmente neste tópico, salientar que as leis de Newton, assim como quaisquer outras leis da Física, deverão ter o mesmo comportamento em qualquer referencial inercial, ou seja, não há um experimento físico que possa distinguir um referencial inercial de outro referencial inercial.

Enfatizamos também, neste tópico, que massa e aceleração independem do referencial inercial em que forem medidos. Achamos fundamental realizarmos este comentário nesta etapa do trabalho, principalmente a respeito da massa, para frisarmos que esta é uma característica de cada corpo, independentemente de seu estado de movimento.

E, finalmente, trabalhamos as transformações de velocidades, conforme apresentado na Seção 2.2, *Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos*, principalmente as equações (5), (6) e (7), que expressam as transformações de Galileu.

Para o desenvolvimento deste tópico foi necessária apenas uma aula.

5.1.3. Tópico: Histórico da Eletricidade e Magnetismo até a unificação

Para o desenvolvimento deste tópico utilizamos a seção 2.3, subseções 2.3.1 a 2.3.4, do texto dos alunos.

Objetivamos principalmente a demonstração da evolução do conhecimento entre dois ramos da ciência, eletricidade e magnetismo, até a sua unificação. A partir daí, demonstramos também as conseqüências e principalmente alguns paradoxos, resultantes desta unificação, dentre os quais um ensejou a teoria da Relatividade Especial.

Iniciamos o desenvolvimento deste tópico com a parte histórica da Eletricidade e do Magnetismo. Os primeiros relatos destas duas áreas de conhecimento ocorreram na Grécia onde ainda não se conhecia bem a diferença entre os fenômenos elétricos e magnéticos. William Gilbert foi quem conseguiu fazer a separação entre estes dois ramos da Física, diferenciando os fenômenos elétricos dos fenômenos magnéticos, em sua grande obra *De Magnete*, em 1600. Destacamos que Gilbert publicou sua obra quase dois mil anos após os primeiros relatos dos gregos, ou seja, em quase dois mil anos não houve evolução nestas áreas de conhecimento e em apenas 300 anos (até 1900) conseguiu-se adquirir conhecimento e domínio destas duas áreas da Física.

Em seguida, fizemos a apresentação dos principais fatos (descobertas), desde Gilbert até o início da unificação, por Oesterd.

Em um segundo momento, descrevemos como Oesterd conseguiu verificar a íntima ligação entre estes dois fenômenos: eletricidade e magnetismo. Ressaltamos que Oesterd não descobriu por acaso a relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos, pois já conhecia indícios da relação entre eles. Então, salientamos aos alunos que esta descoberta, assim como outras, não são obras da mera casualidade, mas que existiu um conhecimento prévio que favoreceu a formação da nova teoria.

Após a verificação de Oesterd, vários foram os fatos relacionados à unificação do Eletromagnetismo. Apresentamos aos alunos alguns dos principais experimentos realizados por Físicos como Àmpere, Biot e Savart, Faraday e Lenz.

Em um terceiro momento, abordamos a obra de Maxwell, destacando que este cientista conseguiu unificar de forma matemática a Eletricidade e o Magnetismo com relações que já haviam sido tratadas por outros. Ressaltamos que Maxwell, em seu trabalho, também incorporou a Óptica ao Eletromagnetismo.

Até este momento fizemos, de forma paralela, no quadro da sala de aula, uma figura destacando os principais acontecimentos da Eletricidade e do Magnetismo, de forma separada, unificando somente a partir de Oesterd, conforme a figura que segue.

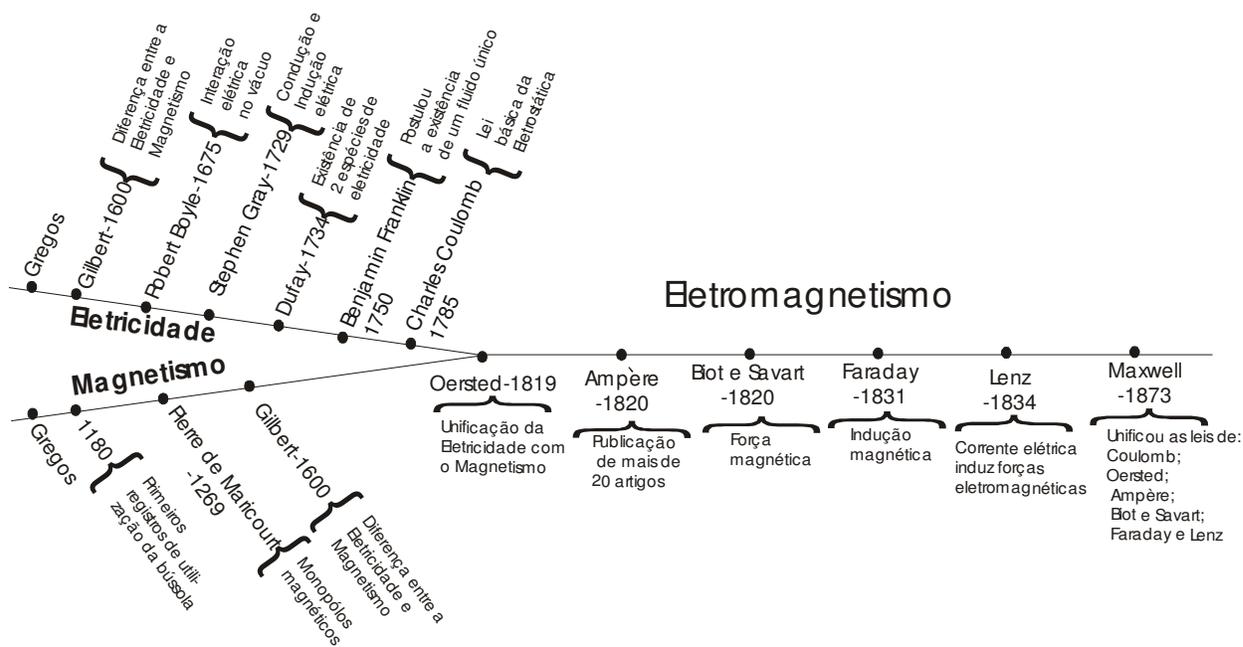


Figura 1

Comentamos que, no final do século XIX, muitos acreditavam não haver mais nada de importante a ser descoberto em Física. Chegava-se a dizer que o conhecimento científico havia chegado ao fim. A Mecânica estava muito bem fundamentada e o Eletromagnetismo estruturado nas equações de Maxwell. Porém, surgiram alguns conflitos.

Neste momento, buscamos resgatar junto aos alunos os seus conhecimentos de ondas mecânicas, escrevendo no quadro quais são as suas principais características. Dentre as características citadas pelos alunos, estava a da necessidade de um meio para a sua propagação. Com isso, procuramos construir juntamente com eles um dos paradoxos oriundos das equações de Maxwell e que se tornou um dos grandes paradoxos do final do século XIX: “como que uma onda não necessita de um meio para se propagar?”. Aproveitamos a discussão com os alunos e abordamos os esforços dos físicos da época para “salvar” o conhecimento da época. Esta busca constava basicamente em determinar

um meio hipotético que deveria preencher todo o Universo e que serviria de base para a propagação das ondas eletromagnéticas. Este meio chamava-se éter.

Porém, as tentativas de detectar este meio foram frustradas, sem resultados positivos. Neste momento, foi de fundamental relevância chamar a atenção dos alunos para o fato de que apesar de muitos autores descreverem que foi a partir deste paradoxo que surgiu a teoria da Relatividade Especial, não foi exatamente este o ponto de partida.

Para concluir este tópico, resolvemos com o grupo de alunos os exercícios 5, 6 e 7, procurando evidenciar um debate, principalmente sobre a não existência de um “método científico” e sobre a evolução do conhecimento, especialmente na Física. Foram necessárias duas aulas para o desenvolvimento deste tópico.

5.1.4. Tópico: Problema do eletromagnetismo com a Mecânica Clássica e origem da Relatividade Especial

Para o tratamento deste tópico trabalhamos a subseção 2.3.5, *Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica Clássica* e a seção 2.4, *Einstein e a origem da Relatividade Especial* do texto dos alunos.

Este tópico tornou-se fundamental para o fechamento da parte histórica, pois os assuntos desenvolvidos até o momento foram essenciais para o entendimento do onde e do porquê surgiu a teoria.

Inicialmente, relembramos com os alunos as dificuldades em se detectar o éter, meio hipotético onde a luz se propagaria. Recordamos as tentativas de Michelson e Morley em detectar o éter através de um instrumento denominado interferômetro.

Mas, conforme o texto dos alunos, não nos preocupamos em descrever como era o funcionamento deste instrumento e as possíveis explicações dadas por Michelson e Morley para a não detecção do éter. Isto porque não foi a partir dos resultados negativos destes experimentos que Einstein elaborou a sua teoria da Relatividade. Salientamos que muitos livros didáticos de ensino médio dão uma abordagem especificando que Einstein partiu dos experimentos frustrados da detecção do éter para elaborar a sua teoria. Discordamos desse posicionamento.

Em seguida, descrevemos um outro paradoxo que consistia basicamente nos resultados conflitantes, que as equações de Maxwell forneciam, com a mudança de um

referencial inercial para outro. Buscamos destacar muito bem este paradoxo, pois para resolvê-lo é que Einstein acabou por elaborar a teoria da Relatividade Especial.

Quando chegamos nesta parte do desenvolvimento do conteúdo, muitos alunos questionavam o que seria a Relatividade Especial, pois até então apenas estávamos descrevendo fatos históricos. Então, aproveitamos esta aflição por parte dos alunos e recordamos tudo o que havíamos descrito da parte histórica desde a primeira aula. Nosso principal objetivo foi fazer, juntamente com eles, uma reflexão para que observassem que a Física, principalmente a partir do século XVI, evoluiu de uma forma contínua e também que ao final do século XIX, ao contrário do que muitos pensavam, a Física passava por uma crise. Eis a questão do final do século em questão: mudar ou não os paradigmas existentes.

Feita esta recapitulação, introduzimos os dois postulados da teoria da Relatividade Especial, em resposta para alguns dos conflitos da época. Alguns alunos não sabiam ao certo o significado de postulado. Dessa forma, aproveitamos a ocasião para solicitarmos que fizessem pesquisas em dois ou mais dicionários sobre o significado do verbo postular. Achamos conveniente este trabalho para instigar-lhes o interesse pela pesquisa, evitando que apenas esperem respostas prontas do mundo.

Destacamos que três das principais conseqüências desses dois postulados foram a dilatação temporal, a contração do comprimento e a relatividade da simultaneidade. Ao comentarmos sobre estas conseqüências, pudemos notar que o interesse pelo assunto começou a aumentar, principalmente no que se refere à dilatação temporal.

Utilizamos duas aulas para o desenvolvimento deste tópico. Ao final, resolvemos com os alunos as questões 9, 10 e 11, e a questão 12 foi utilizada como atividade extra-classe.

5.1.5. Tópico: *Relatividade da simultaneidade*

Neste tópico abordamos o Capítulo 3, *Relatividade da simultaneidade*, tendo como principal objetivo que o aluno fosse capaz de compreender que dois eventos que são simultâneos em um determinado referencial inercial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial.

Resolvemos em aula os exercícios 13 e 14, gerando junto aos alunos um debate sobre as respostas para estas duas questões. Foi necessária apenas uma aula para o desenvolvimento deste tópico.

5.1.6. Tópico: Dilatação temporal e contração do espaço

Este tópico foi desenvolvido utilizando os Capítulos 4, *Dilatação temporal*, e 5, *Contração do espaço*, do texto dos alunos.

Objetivamos principalmente que os alunos compreendessem que tempo e espaço, na Relatividade Especial, deixam de ser absolutos e passam a ser relativos, ou seja, passam a depender do referencial em que forem medidos.

Realizamos a dedução da equação (11) no quadro da sala de aula, conforme se encontra no Capítulo 4 do texto dos alunos. Esta dedução foi bastante simples, exigindo apenas o conhecimento do teorema de Pitágoras. Após esta dedução, verificamos que para a grande maioria dos alunos ficou clara a importância da adoção correta do referencial inercial.

Ressaltamos que a dilatação temporal é uma consequência direta do segundo postulado da Relatividade Especial. Caso a luz possuísse velocidade infinita, não existiria a dilatação temporal.

Refizemos os exemplos 1 e 2, destacando principalmente a interpretação correta do problema, ou seja, identificando quem mede o tempo próprio e quem mede o tempo dilatado.

Ao final da apresentação desta primeira parte do tópico, muitos alunos começaram a questionar a validade da Relatividade Especial, pois para o nosso cotidiano não verificamos tal mudança temporal de um referencial inercial para outro. Argumentamos que não verificamos tais alterações, pois para nós as velocidades a que estamos acostumados são insignificantes em comparação à velocidade da luz.

Resolvemos com os alunos o exercício 17 e, ao final da aula, solicitamos que resolvessem os exercícios 15 e 16, que deveriam ser entregues ao professor para correção posterior.

Em um segundo momento, passamos a descrever uma outra consequência do segundo postulado da Relatividade Especial, a contração do comprimento. Realizamos a dedução da equação (15). Notamos que, ao final desta dedução, muitos alunos apresentavam dúvidas, confundindo o que era o comprimento próprio e o comprimento contraído. Então, salientamos que comprimento próprio é o comprimento medido para quem está em repouso em relação ao objeto da medida e comprimento contraído é o comprimento medido para quem está em movimento relativo ao objeto.

Após a dedução, comentamos a respeito das duas interpretações dadas para a contração do comprimento: a primeira, dada por Lorentz e FitzGerald, onde a contração era resultado da modificação da estrutura da matéria: o éter (meio hipotético onde a luz se propagava) afetava as forças moleculares; a segunda, dada por Einstein, onde a contração do comprimento passou a ter um outro significado, deixando de ser uma contração que afetaria a estrutura da matéria, passando a ser uma contração devido à aparência visual dos objetos em movimento relativo.

Advertimos que muitos livros de ensino médio ainda interpretam como Lorentz e FitzGerald. No entanto, deixamos bem claro que não ocorre uma mudança na estrutura, a contração sendo real, mas não material.

Como exemplo de aplicação da Teoria da Relatividade Especial, utilizamos o da detecção dos múons que são partículas originadas pelos raios cósmicos que se deslocam com velocidade aproximadamente igual à da luz, com um tempo de vida muito pequeno, na ordem de $2,0 \cdot 10^{-6}$ s, o tempo próprio do múon. Mas, apesar do múon possuir um tempo muito pequeno de vida, conseguimos detectá-lo devido à dilatação temporal.

Refizemos o exemplo 3 e solicitamos que resolvessem e entregassem os exercícios 18 e 19, junto aos exercícios 15 e 16 sobre dilatação temporal, ao final da última aula deste tópico.

Foram necessárias três aulas para o desenvolvimento deste tópico.

5.1.7. Tópico: Adição de velocidades

Para este tópico abordamos o Capítulo 6, *Adição de velocidades na Relatividade Especial*, do texto dos alunos.

Iniciamos recordando a adição de velocidades de Galileu, refazendo o exemplo que é apresentado neste capítulo, no qual se tem como resultado uma velocidade relativa superior à velocidade da luz, estando isto em desacordo com as conseqüências do segundo postulada da Relatividade Especial.

Então, para a adição de velocidades, apresentamos as equações (18) e (19). Não realizamos a dedução destas equações por consideramos um tanto quanto complexas para a compreensão de alunos de ensino médio. Mas refizemos o exemplo comentado, que contradizia o segundo postulada, com a equação (18), tendo como resultado uma velocidade igual à velocidade da luz.

Destacamos o significado de cada termo das equações (18) e (19) do texto do aluno.

Refizemos o exemplo 4 e o exercício 22 em aula. Foi necessária apenas uma aula para o desenvolvimento deste tópico.

5.1.8. Tópico: Energia relativística

Tivemos como principal objetivo, neste tópico, capacitar o aluno para compreender a relação entre massa e energia apresentada pela Relatividade Especial. Para isso, utilizamos o Capítulo 7 do texto dos alunos.

Neste tópico, enfatizamos mais a parte teórica, apresentando apenas a equação (21), buscando destacar o significado da relação massa-energia.

Inicialmente buscamos enfatizar que a equação (21) significa que, à medida que um corpo aumenta a sua velocidade, aumenta também seu conteúdo energético. Desta forma, a explicação para que um corpo não possa atingir velocidades superiores à da luz é o fato de que seria necessária uma quantidade infinita de energia. Comentamos que, na equação (21), com $v = c$, o resultado tende para o infinito.

Salientamos muito que uma interpretação da qual discordamos, dada por muitos autores, é a de que existe massa relativística. Segundo esta interpretação, quanto maior a velocidade do corpo, maior a massa do corpo. Muitos consideram esta a explicação para que um corpo não consiga atingir a velocidade da luz.

Resolvemos em aula o exemplo 6 e os exercícios 23, 25 e 26. Desenvolvemos o tópico em duas aulas.

5.1.9. Tópico: Paradoxo dos gêmeos

Neste tópico, contemplamos o Capítulo 9, *Paradoxo dos Gêmeos*. Optou-se por escolher o paradoxo dos gêmeos por este ser um clássico dentro da Relatividade Especial. E, assim como outros tópicos, em muitos livros, este paradoxo é muitas vezes comentado de forma equivocada.

Para descrevermos e analisarmos este paradoxo, utilizamos uma aula inteira. Iniciamos descrevendo em que consiste, destacando que muitos consideram como o paradoxo o envelhecimento do irmão que permaneceu na Terra, mais rapidamente do que o que está em movimento. Mas, ao analisarmos com os alunos, demonstramos que se considerarmos que quem permaneceu na nave ficou em repouso e quem estava na Terra é que estava em movimento, verificamos que quem envelhece mais rapidamente agora é quem permaneceu na nave.

Após esta análise, perguntamos aos alunos se poderíamos considerar a nave como um referencial inercial. Alguns responderam de forma correta, considerando que esta teria momentos de aceleração e desaceleração. Um outro aluno chegou a comentar que quem permaneceu em Terra também não estava em um referencial inercial, já que a Terra está em movimento circular. Desta forma, não podemos tratar o problema com a Relatividade Especial, pois o problema não é simétrico.

Acreditamos que o debate gerado em aula foi muito positivo para a real compreensão do significado do paradoxo dos gêmeos.

5.1.10. Tópico: Relatividade Geral

Neste último tópico abordamos o Capítulo 10, *Relatividade Geral*. Neste capítulo, apenas fizemos um comentário rápido sobre o que é a teoria da Relatividade Geral, cujo principal objetivo foi o de que o aluno soubesse que para referenciais não-inerciais

devemos utilizar os conceitos da Relatividade Geral. Comentamos que esta teoria hoje é a base do conhecimento da cosmologia, com ampla aplicação em questões como o surgimento do Universo.

5.2. Avaliação do questionário antes e após a aplicação da proposta

Esta avaliação constou na aplicação de um questionário que continha doze questões, apresentando três possibilidades de resposta aos alunos: discordava, desconhecia ou concordava com as afirmações. Com as questões propostas, buscamos constatar o nível de conhecimento dos alunos, não apenas de conceitos relacionados à teoria da Relatividade Especial, mas também à parte histórica da Física. No apêndice C encontra-se o questionário.

O questionário foi aplicado em dois momentos distintos, em cada uma das turmas: antes e após a aplicação do projeto. Optou-se por realizar a aplicação nesses dois momentos, para que pudéssemos comparar e verificar a evolução da construção do conhecimento dos alunos.

O questionário de avaliação foi aplicado nas seguintes datas: Colégio Cenecista Carlos Maximiliano (Max), nos dias 15 de outubro (pré) e 02 de dezembro (após); na Escola Técnica Municipal Farroupilha (Farroupilha), na Turma 31 - nos dias 21 de outubro (pré) e 23 de novembro (após) e na Turma 32 - nos dias 20 de outubro e 23 de novembro.

A seguir, apresentaremos os resultados dos dois momentos através de gráficos e compararemos o desempenho dos alunos.

A primeira questão foi abordada para analisarmos se deveríamos dar um enfoque da inexistência de um método, de uma receita de se fazer ciência. A partir dos dados coletados na primeira avaliação, verificamos que é muito forte a visão de que exista um método científico para a construção de uma teoria. A afirmação colocada aos alunos foi a seguinte:

1) Toda teoria científica segue rigidamente um método científico, onde o primeiro passo é a observação.

A seguir estão os gráficos relacionados aos resultados obtidos antes e após a aplicação do projeto.

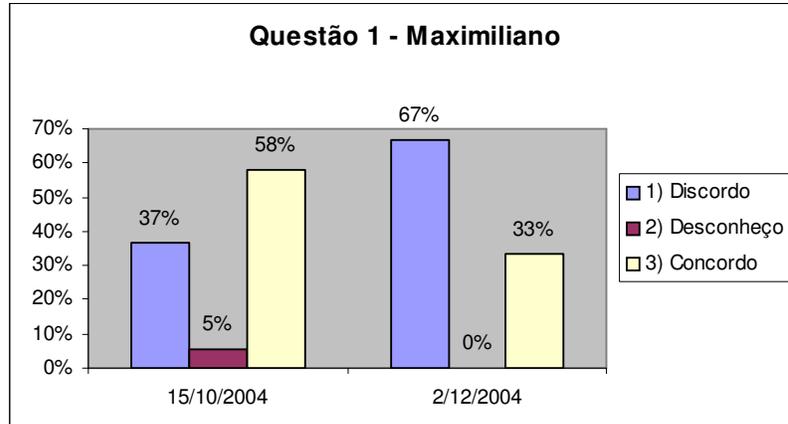


Gráfico 1

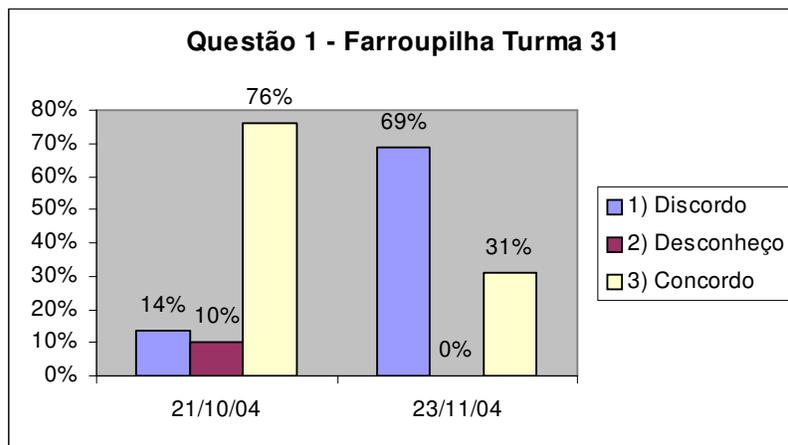


Gráfico 2

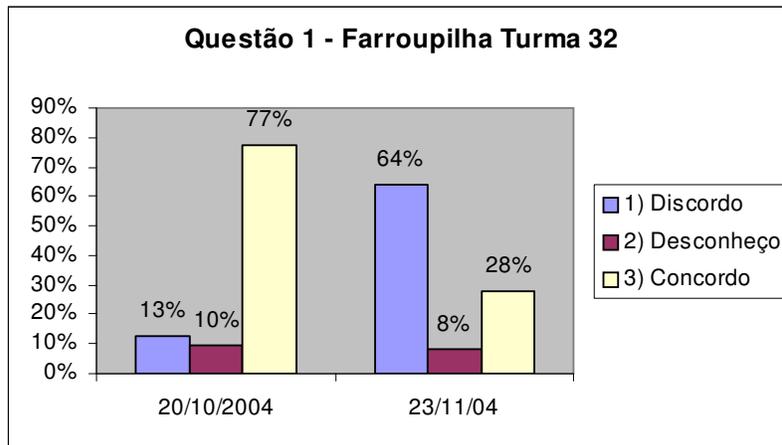


Gráfico 3

Ao compararmos os gráficos, verificamos que a maioria dos alunos, antes da aplicação do projeto, possuía uma visão da existência de um método científico. Esta visão é mais forte, principalmente na Escola Farroupilha, e uma possível causa talvez seja a existência de uma disciplina intitulada Técnicas de Projetos de Método Científico, que aborda o método científico.

Após a aplicação do projeto, verificamos que houve uma mudança significativa na idéia que os alunos fazem sobre o fazer Ciência.

Ao analisarmos esta primeira questão, concluímos que houve uma considerável mudança conceitual positiva nas duas escolas.

A segunda questão que abordamos foi a respeito do conhecimento do pensamento aristotélico. Achamos importante avaliar o nível de conhecimento dos alunos quanto a esta forma de se fazer ciência, pois esta opinião permaneceu incontestável por quase 2.000 anos, e, hoje, ainda verificamos em muitos alunos a existência deste pensamento. A questão abordada foi a seguinte:

2) O pensamento aristotélico começou a ser contestado mais veementemente apenas nos séculos XVI e XVII e uma de suas características era a de uma Física marcadamente filosófica.

Os gráficos 4, 5 e 6 apresentam os resultados dos alunos do Colégio Maximiliano e das turmas 31 e 32 da Escola Farroupilha - antes e após a aplicação do projeto - relacionados com a segunda questão.

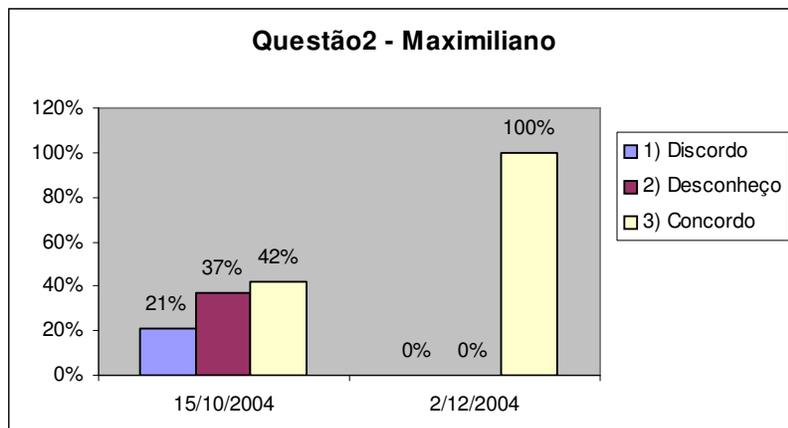


Gráfico 4

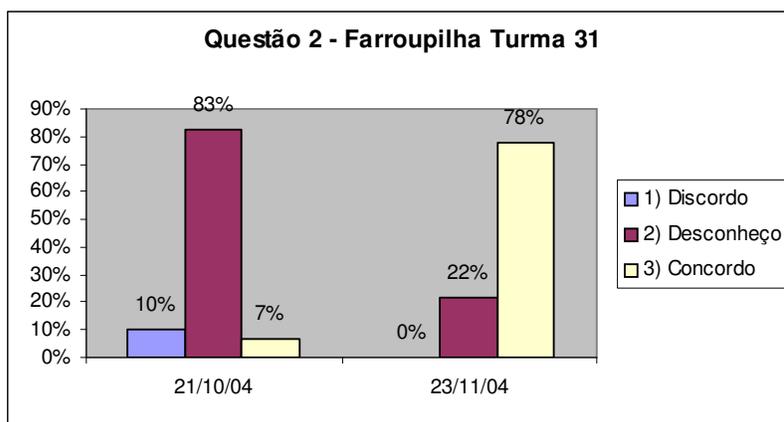


Gráfico 5

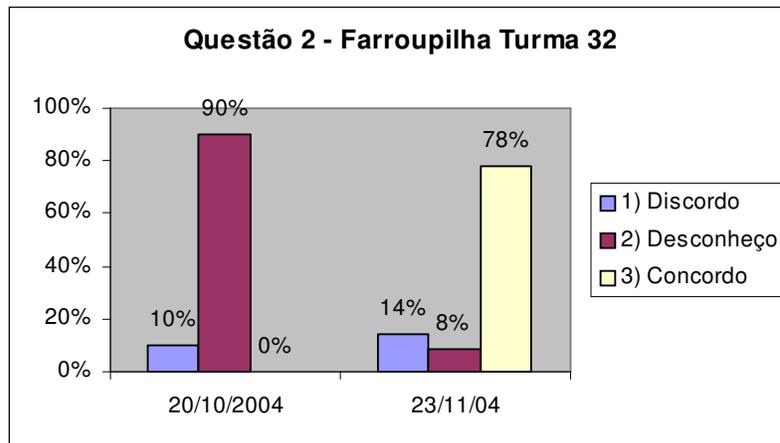


Gráfico 6

Comparando os gráficos, podemos constatar que inicialmente o desconhecimento sobre a questão era muito grande, ou seja, muitos alunos desconheciam qualquer aspecto referente a Aristóteles, principalmente na Escola Farroupilha. Apesar do índice de concordância ser mais elevado no Colégio Maximiliano, mesmo assim, mais de 50% dos alunos discordavam ou desconheciam a questão. Uma das possíveis causas dos alunos do Maximiliano possuírem um conhecimento mais elevado a respeito do pensamento aristotélico deve-se, muito provavelmente, à disciplina de Filosofia.

Para a nossa satisfação, após a aplicação, o nível de concordância a respeito da questão chegou a 100% na turma do Maximiliano.

Podemos concluir que, a respeito do pensamento aristotélico e sua influência na forma de fazer ciência, o conteúdo foi muito bem absorvido pelos alunos.

A terceira questão era apenas para verificar se os alunos conheciam a ordem de sucessão de alguns dos grandes pensadores da Física, pois muitas vezes fala-se em Galileu e Einstein, equivocadamente, como se pertencessem a uma mesma época. A questão abordada foi a seguinte:

3) A ordem de sucessão de alguns grandes pensadores da Física foi: primeiro Galileu, em seguida Aristóteles, depois Einstein, depois Newton.

Claro que a resposta esperada era a de que discordassem, pois a ordem correta seria Aristóteles, Galileu, Newton e depois Einstein.

Os gráficos 7, 8 e 9 apresentam os resultados das três turmas antes e após a aplicação do projeto.

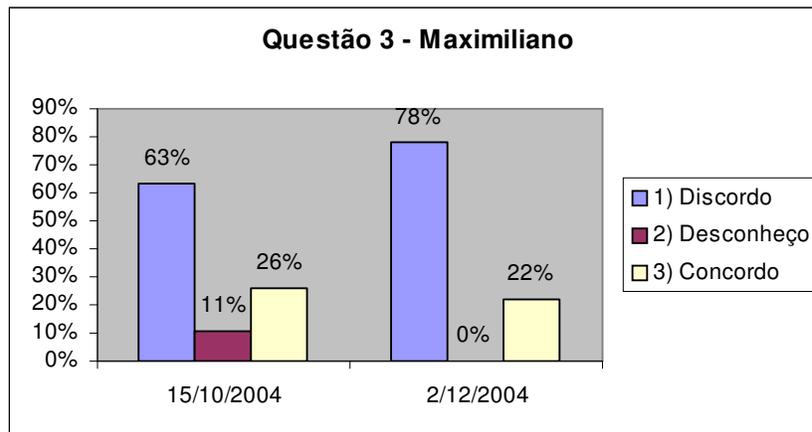


Gráfico 7

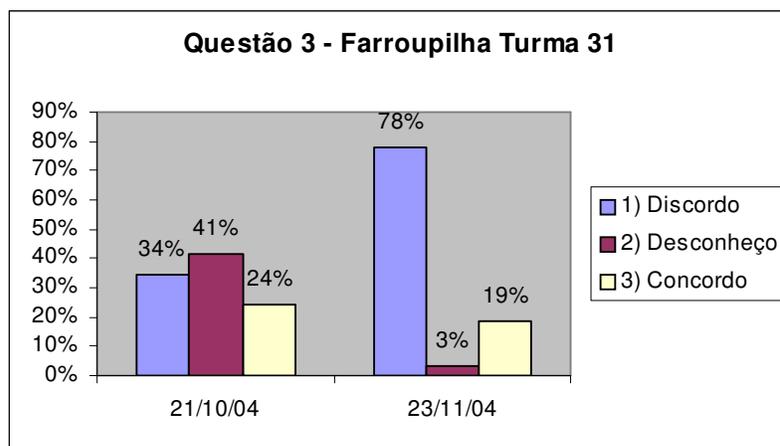


Gráfico 8

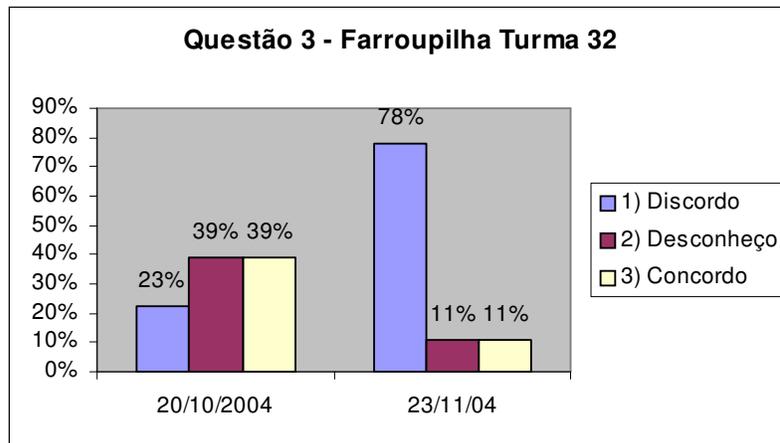


Gráfico 9

Ao checar aos gráficos 7, 8 e 9 podemos concluir que a maioria dos alunos do Maximiliano já discordava da seqüência apresentada. No entanto, nas duas turmas da Escola Farroupilha, a maioria dos alunos desconhecia ou concordava. Esta talvez seja uma das falhas ocorridas em muitas escolas a respeito do estudo de algumas teorias: ensina-se o conceito e, muitas vezes, o contexto histórico em que os estudos foram realizados não é abordado.

Contudo, após a aplicação do projeto, a maioria dos alunos das três turmas discordou da ordem na qual colocamos a sucessão dos físicos. Então, podemos concluir que, ao trabalharmos uma nova teoria com os alunos, é fundamental situar em qual época esta teoria ocorreu, quem foram os principais pensadores e quais suas conseqüências.

A quarta questão tinha como principal objetivo o de verificar se havia algum conhecimento da influência dos trabalhos de Maxwell para a elaboração da teoria da Relatividade Restrita. A questão era a seguinte:

4) Um cientista desenvolve suas teorias a partir de conhecimentos já existentes. Como exemplo, podemos citar o desenvolvimento da teoria da Relatividade Especial com base, entre outros conceitos, nas equações de Maxwell.

A seguir temos os gráficos 10 (Colégio Maximiliano), 11 (turma 31) e 12 (turma 32), referentes às respostas dadas para a questão quatro.

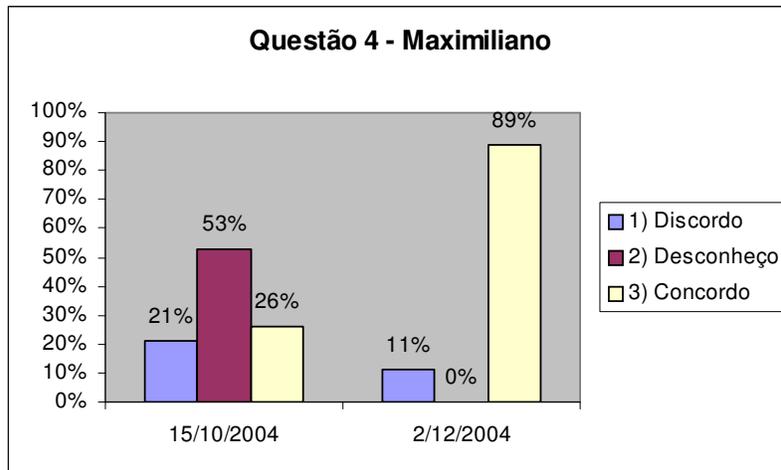


Gráfico 10

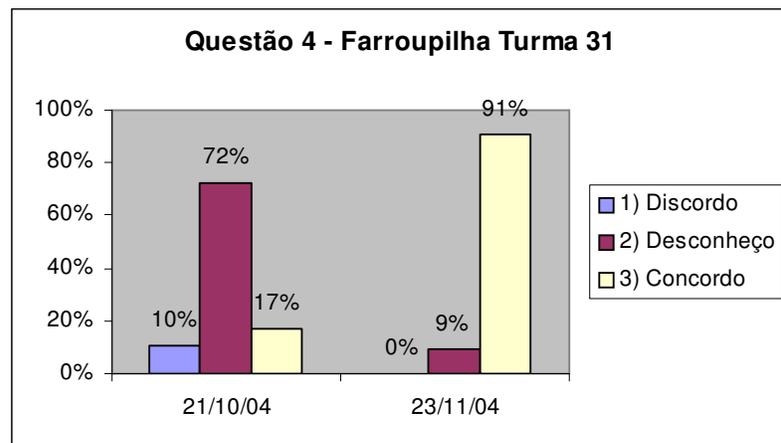


Gráfico 11

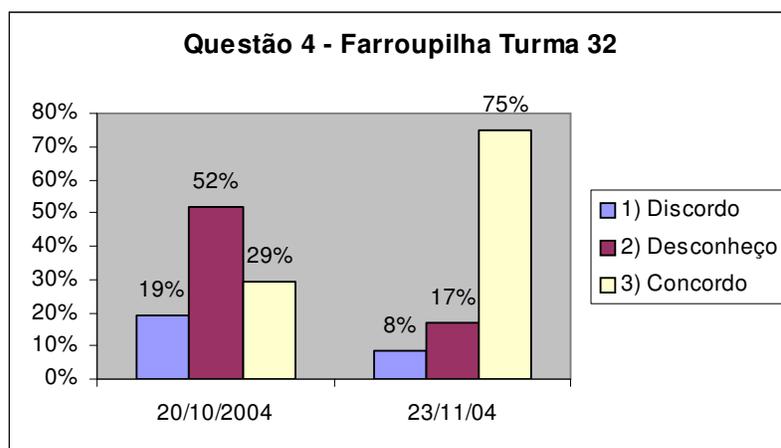


Gráfico 12

Ao analisarmos estes gráficos, verificamos que, nas três turmas, a maioria dos alunos desconhecia a dependência que Einstein teve, em relação às equações de Maxwell, para a elaboração da Relatividade Especial. Este desconhecimento não é nenhuma novidade, pois no ensino médio, em geral, não apresentamos, ou sequer comentamos, os trabalhos de Maxwell.

Mas, podemos verificar que após a aplicação do material, em todas as turmas, a maioria passou a concordar com esta relação entre os trabalhos de Maxwell e os de Einstein, sendo que uma das turmas, cujo índice de concordância, antes da aplicação do projeto era de apenas 17%, chegou a ter uma concordância de 91%. O maior índice de discordância passou a ser de 11%, o que antes chegava a 21% .

A questão número cinco refere-se ao pensamento de muitos físicos e comunidade em geral, ao final do séc. XIX, que consideravam que não havia mais nada a ser desenvolvido na Física, nesta época. Esta questão foi colocada porque diversas vezes os alunos questionaram se ainda havia algo a ser desenvolvido na Física. Para nossa surpresa, o resultado, antes da aplicação, já era bastante satisfatório.

A afirmação colocada no questionário foi a seguinte:

5) A Física é uma ciência completa, acabada, não havendo mais nada a ser desenvolvido.

A seguir estão os gráficos das três turmas.

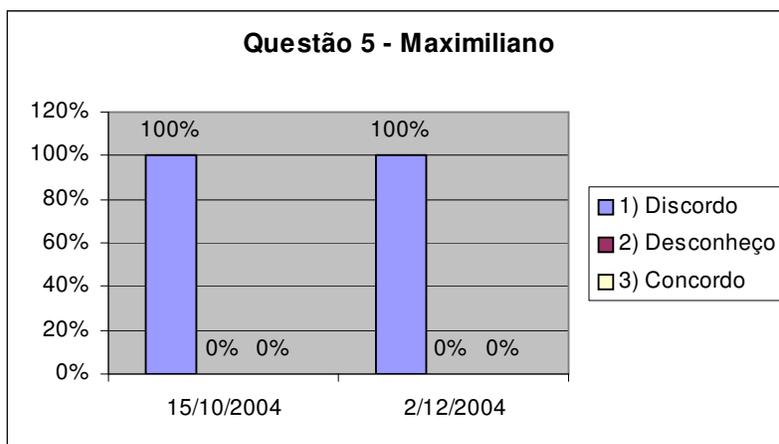


Gráfico 13

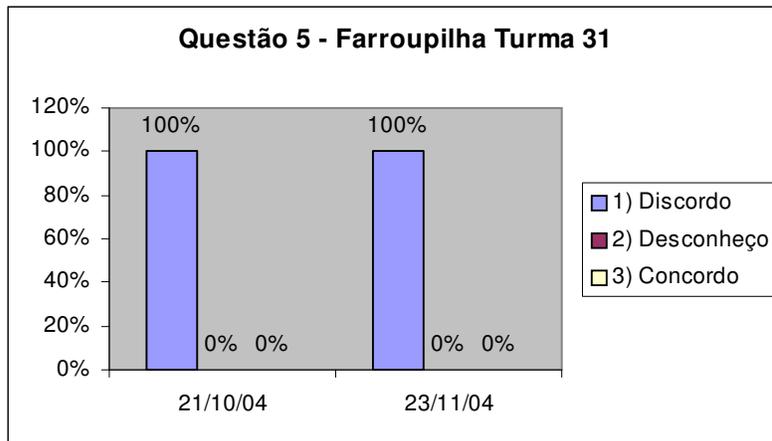


Gráfico 14

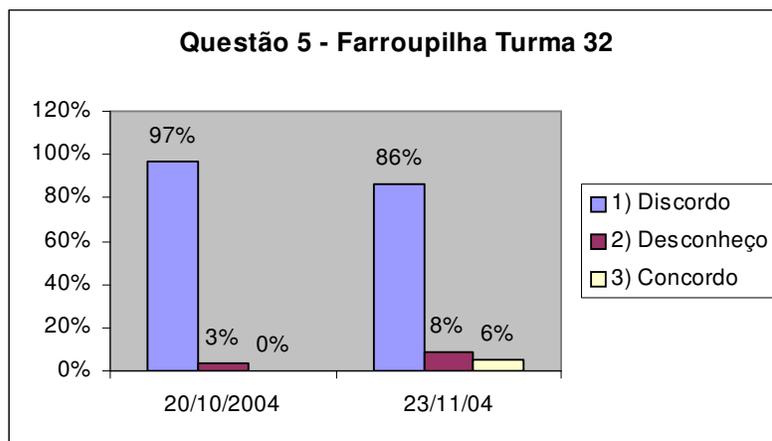


Gráfico 15

Para nossa surpresa, em duas turmas 100% dos alunos consideraram a afirmação falsa, ou seja, consideraram a Física como uma ciência que não está acabada. Apenas na turma 32 da Escola Farroupilha houve uma mudança, cujo índice passou de 97% para 86% de alunos que discordavam. Mas, o mais inusitado é que dois alunos passaram a concordar com a afirmação.

A sexta questão verifica a compreensão a respeito de referenciais inerciais. Para a compreensão da teoria da Relatividade Especial, é fundamental que se saiba o que é um referencial inercial, ou pelos menos que se tenha alguma noção a respeito. A partir das respostas de antes da aplicação do projeto, pudemos direcionar, ou seja, dar uma ênfase no

significado de referenciais inerciais, pois, para a nossa surpresa, um número bastante significativo desconhecia o significado de tais referenciais. A afirmação foi a seguinte:

6) Um referencial inercial é um referencial não acelerado.

Os gráficos 16, 17 e 18 são referentes às respostas dadas pelos alunos das três turmas antes e após a aplicação do projeto referente à questão seis.

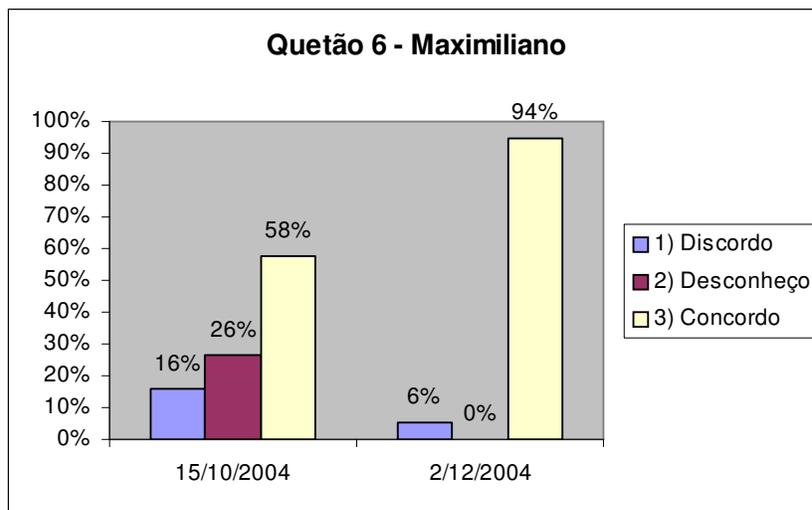


Gráfico 16

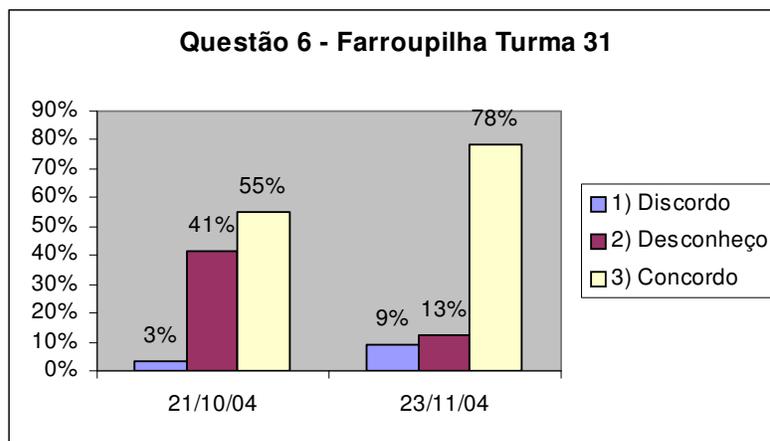


Gráfico 17

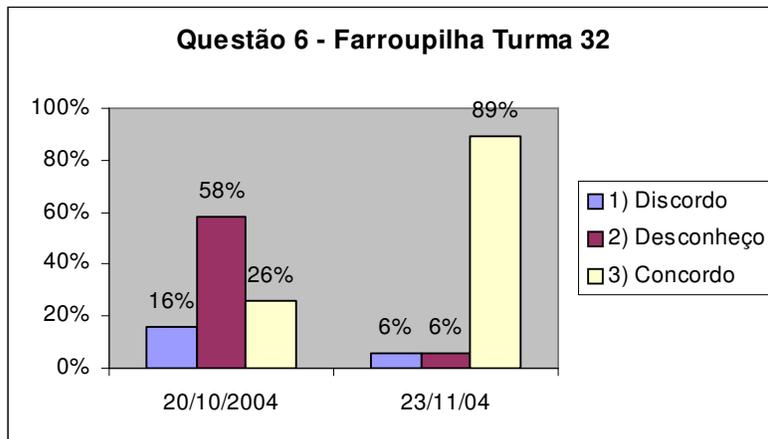


Gráfico 18

Verificamos que o número de alunos que inicialmente desconhecia a afirmação foi reduzido de forma significativa. A turma que teve uma mudança mais evidente foi a 32 da Escola Farroupilha. Podemos concluir que os alunos, de modo geral, absorveram o significado de referencial inercial.

A questão sete aborda a velocidade da luz. O segundo postulado está diretamente associado a este conceito. Isto trouxe grandes conseqüências para a teoria da Relatividade. Então, consideramos que era fundamental avaliarmos o nível de conhecimento dos alunos a respeito do limite da velocidade. A afirmação foi a seguinte:

7) A velocidade da luz é finita.

Os gráficos a seguir, 19, 20 e 21, são referentes às respostas dadas pelos alunos para a questão sete.

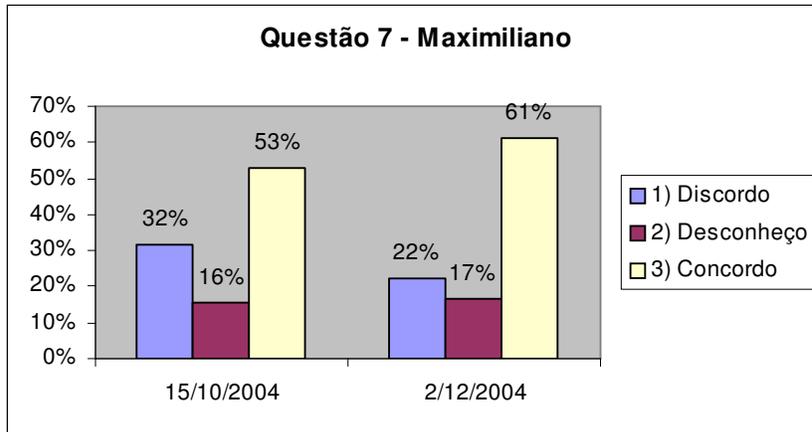


Gráfico 19

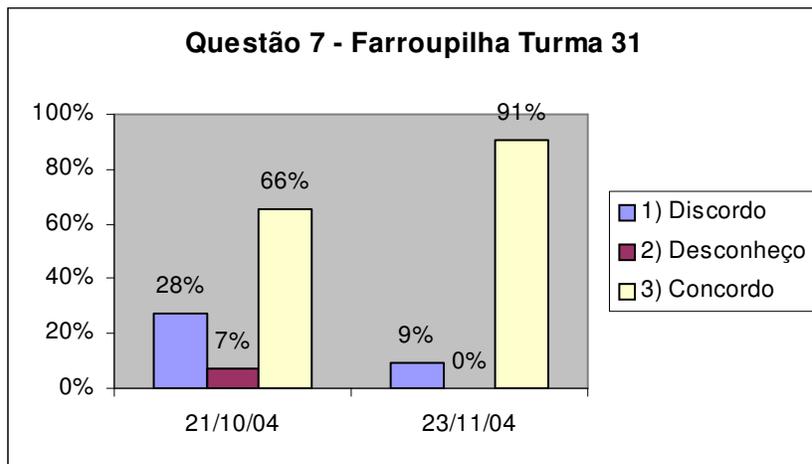


Gráfico 20

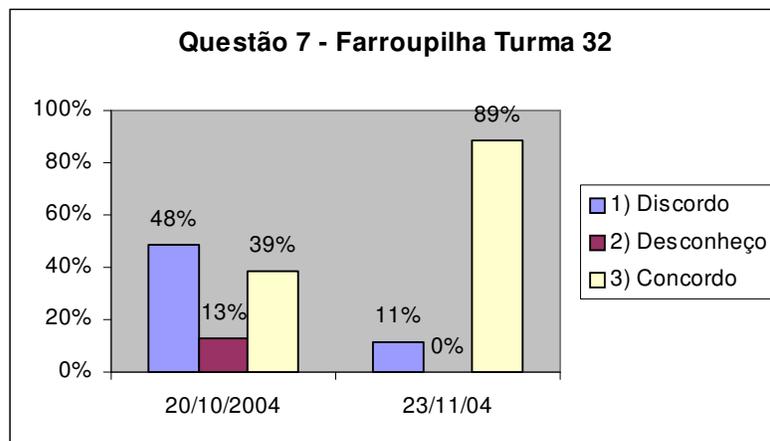


Gráfico 21

Apenas a Turma 32 da Escola Farroupilha, no primeiro momento, teve a maioria dos alunos discordando da afirmação, ou seja, consideravam que a luz possuía velocidade infinita. Então, com esses resultados, tivemos o cuidado de deixar bem claro que a luz possui uma velocidade finita e que isto está de acordo com as equações de Maxwell. Sendo assim, os resultados, após a aplicação do projeto, foram muito satisfatórios.

Já a turma da Escola Maximiliano teve também um aumento com relação ao índice de concordância a respeito da questão da velocidade da luz ser finita.

A questão oito está direcionada para verificar o nível de conhecimento a respeito da impossibilidade de um corpo massivo atingir a velocidade da luz.

Uma das conseqüências da Relatividade Especial é a de que um corpo massivo não pode atingir a velocidade da luz. Isto porque seria necessária uma quantidade infinita de energia para a atingir tal velocidade. Muitos alunos, mesmo não tendo contato em sala de aula com os conceitos da Relatividade, estão acostumados a se depararem com tais conceitos em revistas, jornais ou internet. Sendo assim, vários já possuíam algum conhecimento a respeito desses conceitos. Já era esperado que houvesse um número significativo de respostas discordando da afirmação, mesmo antes da aplicação do projeto. A questão oito é a seguinte:

8) Um corpo de massa muito pequena pode atingir velocidades superiores à da luz.

Os gráficos 22, 23 e 24 referem-se à questão oito para as três turmas com os resultados de antes e após a aplicação do projeto.

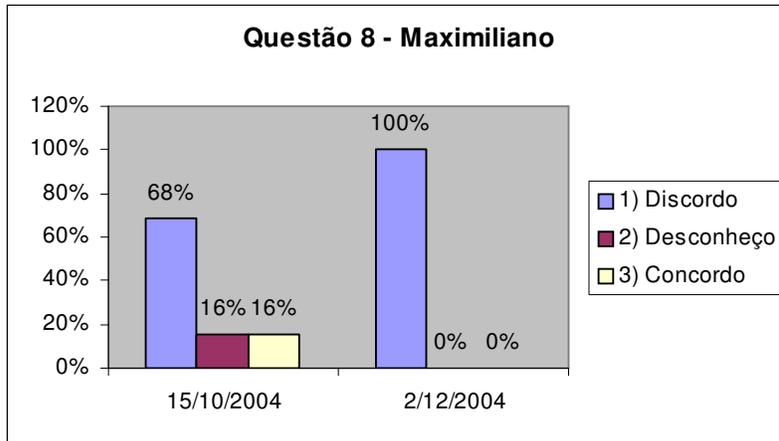


Gráfico 22

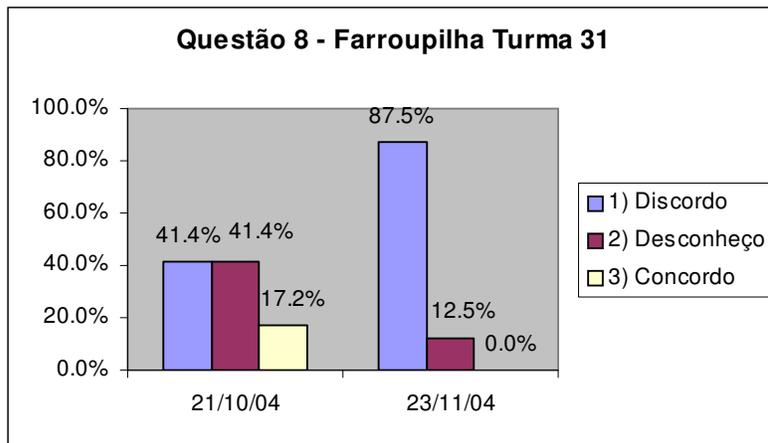


Gráfico 23

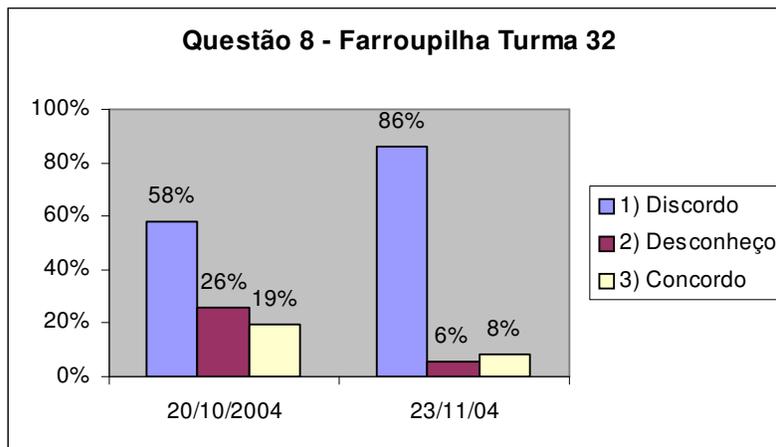


Gráfico 24

Conforme já esperávamos, mais de 50% de todos os alunos já consideravam que um corpo massivo não pode atingir a velocidade da luz. Após a aplicação do projeto, chegou-se a ter um índice de 100% de discordância da afirmação no colégio Carlos Maximiliano. Na Escola Farroupilha, a média ficou em torno de 87% de discordância da afirmação, o que já é um resultado muito positivo, levando-se em consideração que mesmo quem não havia ouvido falar que um corpo massivo não pode atingir a velocidade da luz, pôde assimilar de forma satisfatória este conceito após o desenvolvimento do projeto.

A questão nove trata do conceito de massa relativística. Uma idéia bastante difundida é o conceito de que a massa do corpo aumenta à medida que este se aproxima da velocidade da luz. Não são raros os livros de ensino médio, e até mesmo de nível superior, que falam da massa relativística. Este é um conceito do qual discordamos e que muitos consideram como consequência direta da Relatividade Especial. Nessa visão, achamos fundamental analisar o nível de conhecimento dos alunos a respeito da questão. Fizemos uma afirmação que vem ao encontro desta forma de analisar a Relatividade Especial. A questão nove afirma o seguinte:

9) A massa de um corpo aumenta à medida que sua velocidade se aproxima da velocidade da luz.

Os gráficos 25, 26 e 27 apresentam os índices das respostas dadas pelos alunos antes e após aplicação do projeto referente à questão nove.

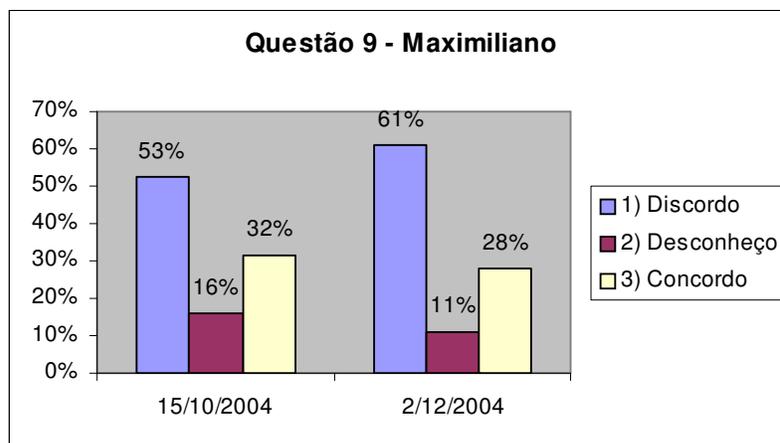


Gráfico 25

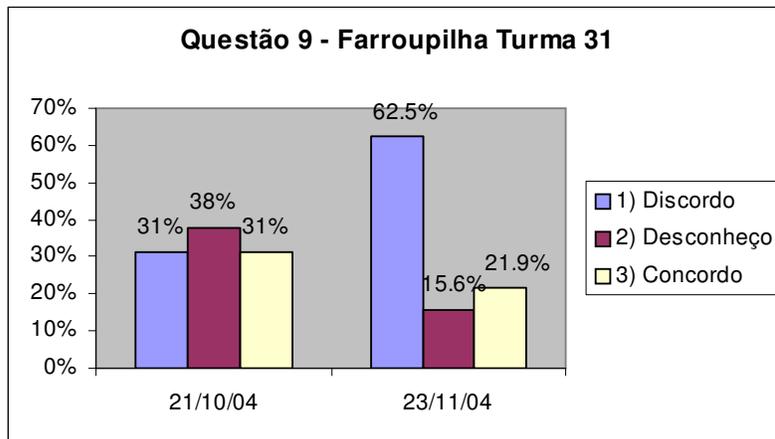


Gráfico 26

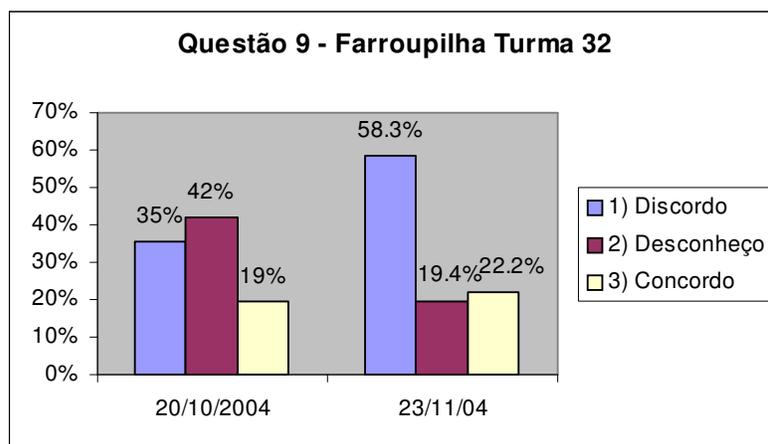


Gráfico 27

Ao analisarmos os gráficos, verificamos que apenas entre os alunos da Escola Maximiliano é que houve uma maioria que discordava da afirmação antes de se aplicar o projeto, ou seja, a maioria considerava que a massa não aumentava à medida em que um corpo se aproxima da velocidade da luz. Nas duas turmas do Farroupilha, cerca de 40% dos alunos desconheciam tal afirmação.

Após o desenvolvimento do projeto, nas três turmas, houve um aumento quanto à discordância da afirmação. Comparando os três gráficos, podemos observar que a turma que acabou tendo o melhor desempenho após a aplicação do projeto foi a turma 31. Gostaríamos de obter resultados melhores, mas muitas vezes é difícil mudar o que já se encontra no subconsciente do aluno.

A questão 10 refere-se à contração do espaço. Dentre as conseqüências da Relatividade Especial, temos a contração do espaço no sentido do deslocamento do corpo. Isto, em geral, não é tratado com os alunos durante o ensino médio. Então, achamos conveniente colocar uma questão que abordasse este tema. A afirmação foi a seguinte:

10) Uma das conseqüências da teoria da Relatividade Especial é que os corpos se contraem no sentido do movimento.

Os gráficos 28, 29 e 30 referem-se às respostas dadas pelas três turmas para a questão 10, antes e após a aplicação do projeto.

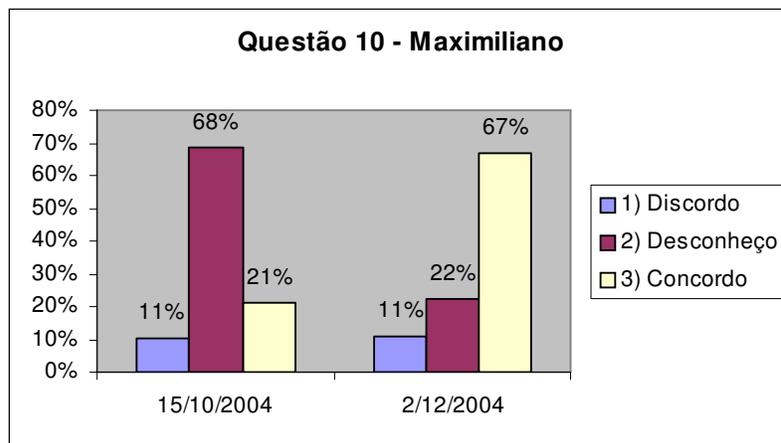


Gráfico 28

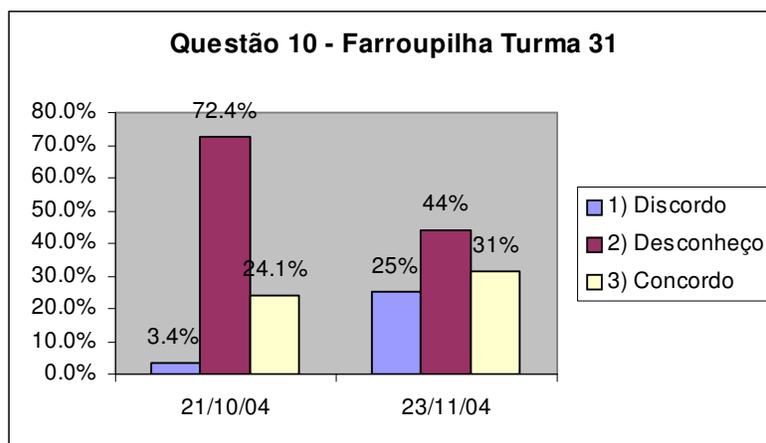


Gráfico 29

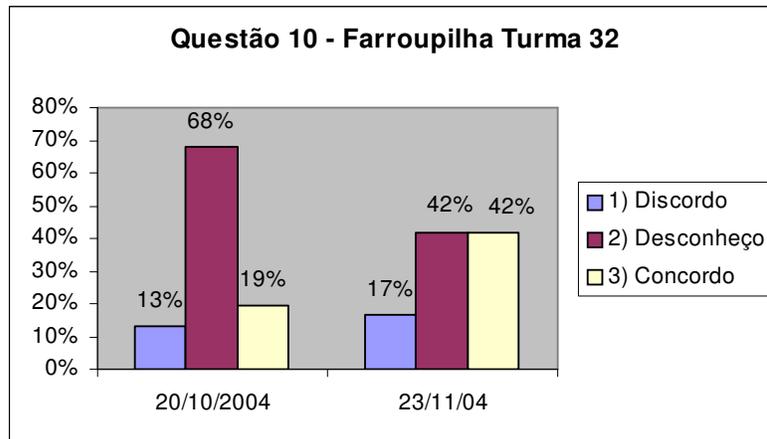


Gráfico 30

Nas três turmas, 70% dos alunos, em média, desconheciam tal afirmação. Porém, após a aplicação do projeto, precisamos analisar as respostas dadas pelos alunos de duas formas distintas, pois a afirmação poderia ter duas interpretações. A primeira seria uma contração do espaço como diminuição do tamanho, conforme a interpretação dada por FitzGerald. Para quem interpretou desta forma, a resposta deveria ser de discordância da afirmação. A segunda interpretação possível da questão seria a dada pela Relatividade Especial, onde há uma contração real mas não material do comprimento. Esta foi a interpretação dada pela maioria dos alunos. As respostas mais surpreendentes foram as dadas pelos alunos da Escola Farroupilha, onde um índice muito elevado respondeu que desconheciam tal afirmação, talvez pelo fato de haver um conflito entre estas duas interpretações.

A décima primeira afirmação foi referente à construção da teoria da Relatividade Especial, pois, como bem sabemos, Einstein partiu de um paradoxo, das equações de Maxwell com as transformações de Galileu. Nesta afirmação, buscamos verificar o conhecimento teórico a respeito da construção da teoria da Relatividade Especial. A resposta esperada para a afirmação era de discordância. A afirmação foi a seguinte:

11) Einstein elaborou toda a teoria da Relatividade individualmente, sem a necessidade de possuir conhecimentos relacionados a outros ramos da Física.

Os gráficos 31, 32 e 33 referem-se às respostas dadas pela três turmas para afirmação 11.

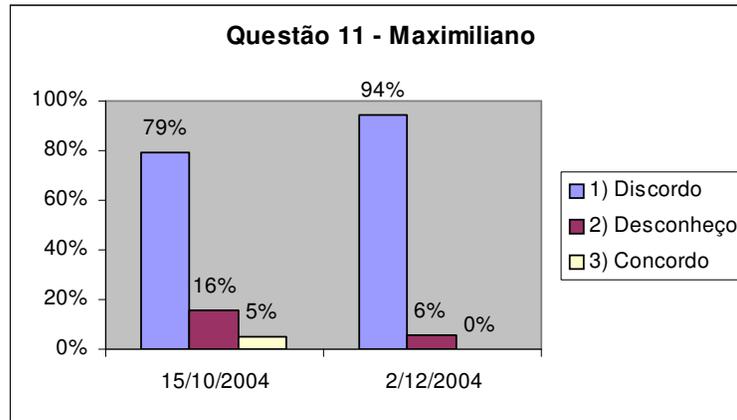


Gráfico 31

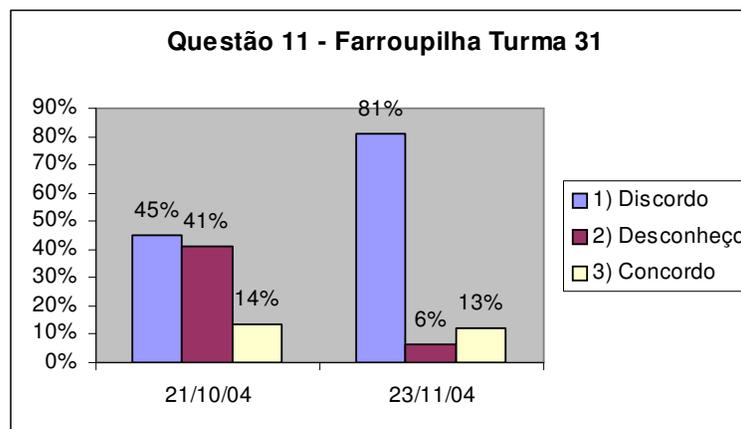


Gráfico 32

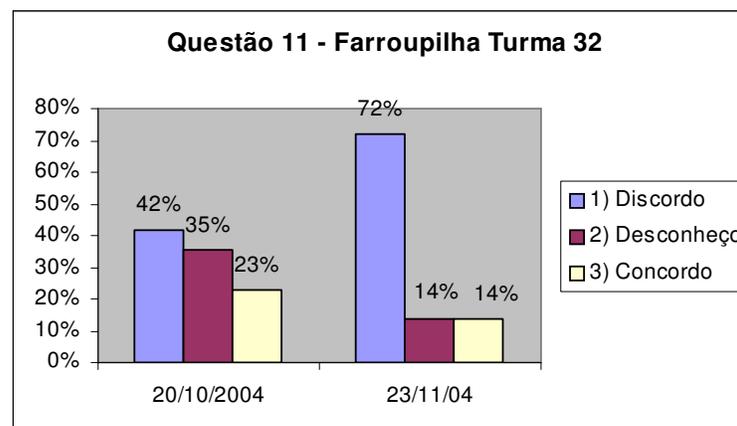


Gráfico 33

De forma geral, as três turmas responderam discordando da afirmação já antes do desenvolvimento do projeto. Mas, após sua aplicação, o índice de rejeição da afirmação subiu significativamente. Em nenhuma das turmas ocorreu um índice inferior a 70%. Concluímos que os tópicos referentes à elaboração da Relatividade Especial de modo geral ficaram esclarecidos.

Na última questão apresentamos o princípio da equivalência massa-energia, talvez a mais famosa das equações da Física. Afirmamos que esta equação foi uma das conclusões de Einstein e que significa o princípio da equivalência massa-energia. A resposta esperada era a de concordância. A afirmação é a seguinte:

12) A equação $E = m.c^2$, desenvolvida por Albert Einstein, expressa o princípio da equivalência massa-energia.

Os últimos três gráficos são referentes à questão 12, para as três turmas, antes e após a aplicação do projeto.

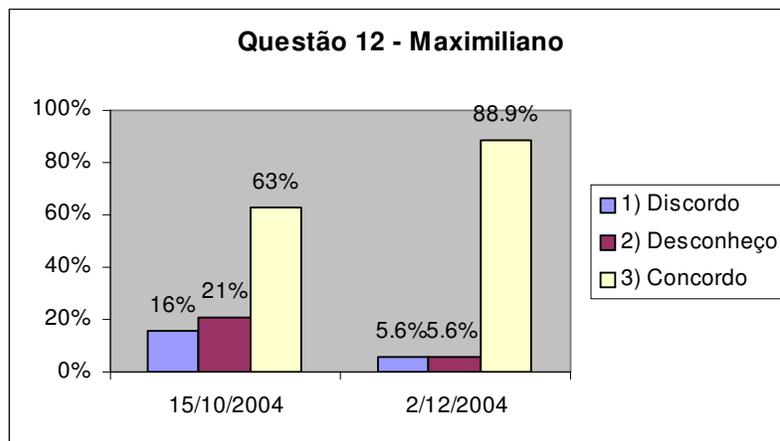


Gráfico 34

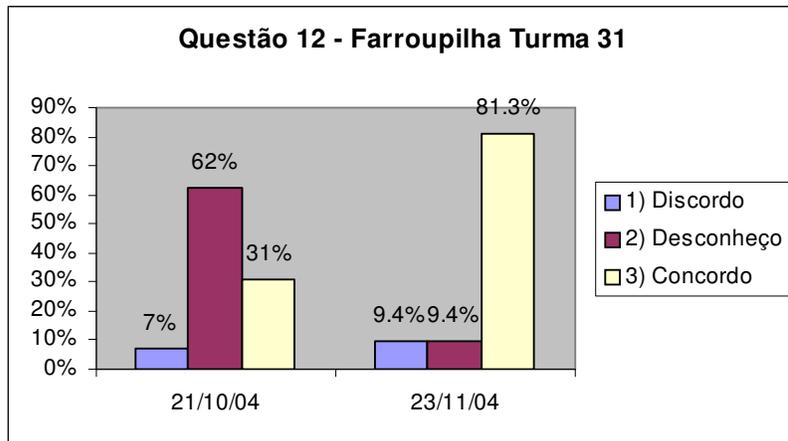


Gráfico 35

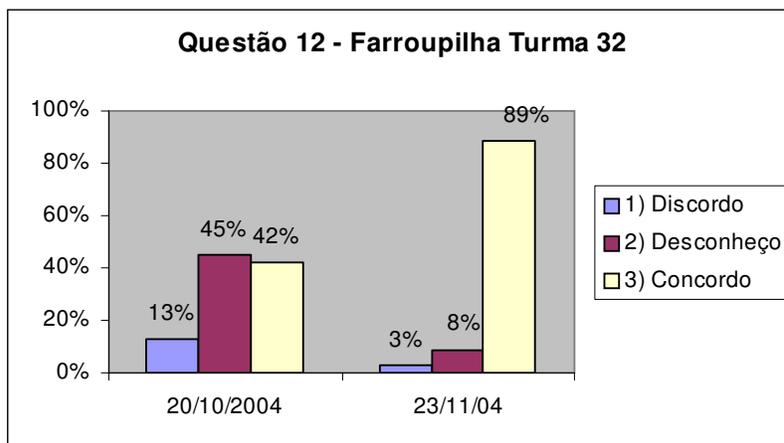


Gráfico 36

O resultado obtido com esta última afirmação foi bastante satisfatório, pois em todas as turmas mais de 80% dos alunos concordaram com o significado da afirmação. Podemos, também, verificar que a maioria dos alunos da Escola Farroupilha desconheciam tal afirmação, ou por desconhecer a equação, ou por não saberem bem ao certo o seu significado, o que é mais provável.

5.3. Análise da prova

Os alunos foram avaliados tanto quanto a sua participação em aula, quanto à resolução de exercícios. Também foi realizada, ao final das atividades, uma avaliação escrita, através de uma prova sem consulta.

Cabe salientar que, devido ao fato do projeto ter sido desenvolvido ao final do ano, muitos dos alunos já estavam aprovados pela média das notas dos bimestres anteriores, não se preocupando em realizar a prova utilizando todo o seu potencial.

A prova encontra-se no Apêndice D e a média dos alunos foi bastante satisfatória. A prova continha 11 questões, todas com igual valor. As médias das turmas da Escola Farroupilha foram as seguintes: Turma 31, média 62; turma 32, média 58. Os alunos do Colégio Carlos Maximiliano obtiveram média 70.

A seguir, apresentamos um breve comentário sobre o desempenho dos alunos em cada uma das questões. Os percentuais referem-se ao total de alunos (três turmas).

A primeira questão da prova versava sobre o conhecimento a respeito do pensamento filosófico de Aristóteles. Não foi uma questão que abordou a Relatividade Especial de forma direta, mas, conforme já citamos, acreditamos que o conhecimento acerca da influência da forma de se fazer Ciência de Aristóteles é muito importante. A questão buscava verificar se o aluno conhecia o nome deste filósofo e a forma como ele descrevia a Natureza.

A grande maioria (próximo de 90%) respondeu que o filósofo ao qual a questão fazia referência era Aristóteles. Porém, quase 75% dos alunos responderam que a forma como ele descrevia a Natureza era que cada elemento (ar, fogo, água e terra) possuía seu lugar no Universo. A resposta que esperávamos era que Aristóteles descrevia a Natureza de maneira filosófica, sem base experimental, nem matemática.

A questão dois solicitava aos alunos que fizessem uma comparação entre a Relatividade galileana e a Relatividade einsteiniana. Consideramos importante esta distinção, pois, para nosso aluno do ensino médio, comumente é apenas apresentada a Relatividade galileana. O desempenho das três turmas pode ser considerado satisfatório, pois em torno de 71% dos alunos conseguiram acertar toda a questão. O restante dos alunos acertou parcialmente, comparando apenas alguns itens.

A terceira questão abordou o ponto de partida de Einstein para a elaboração da Relatividade Especial. Consideramos fundamental este conhecimento, pois ao analisarmos vários livros de ensino médio, observamos que eles consideram que Einstein teve como ponto de partida a dificuldade em se detectar o éter, ou seja, o paradoxo das ondas eletromagnéticas, de não necessitarem de um meio material para se propagar. O que procuramos fazer foi apresentar aos alunos que o ponto de partida para Einstein elaborar a Relatividade Especial era o fato de que as Equações de Maxwell apresentavam resultados conflitantes, quando se mudava de um referencial inercial para outro.

O desempenho dos alunos foi muito abaixo do esperado, pois cerca de 37% deles responderam de forma correta à questão, em torno de 50% deixaram a questão em branco e os demais responderam de forma errada. Surpreendentemente, cerca de 5% responderam que o ponto motivador era o paradoxo dos gêmeos. Uma das possíveis explicações para tal desempenho pode ser o fato de que este tópico foi um dos primeiros a serem tratados.

Na questão quatro o desempenho dos alunos foi ótimo, com um índice de acertos próximo dos 100%. Nesta questão colocamos uma afirmação e pedimos a opinião dos alunos a respeito da mesma. A afirmação apresentava uma idéia muito comum sobre a forma como se elabora uma nova teoria científica, sem a necessidade de se conhecer outras teorias já existentes. Muitos alunos, para salientar a discordância desta visão, colocaram em sua resposta uma expressão utilizada por Isaac Newton, quando ele diz *que se enxergou mais longe era porque estava sobre ombros de gigantes*, referindo-se a conhecimentos já existentes quando elaborou as suas teorias.

Na quinta questão, solicitamos aos alunos que descrevessem quais são os dois postulados da Relatividade Especial. Também foi solicitado que citassem uma consequência que cada um dos postulados acarretou. Responderam à questão de forma totalmente correta cerca de 58% dos alunos, enquanto que o restante dos alunos respondeu de forma incompleta, descrevendo apenas os dois postulados sem citar alguma consequência.

Na sexta questão, abordamos a interpretação dada por FitzGerald a respeito da contração do comprimento, que afirmava que o comprimento de um objeto diminuía na direção do deslocamento. Para Einstein, o que ocorre é uma contração real mas não material na direção do deslocamento, o que depende do referencial do qual estamos vendo o movimento. Nesta questão pedimos para que os alunos analisassem a interpretação dada

por FitzGerald. A resposta esperada era de que os alunos dissessem que esta interpretação estava em desacordo com a Relatividade Especial.

Para a sexta questão, apenas 40% dos alunos responderam de forma correta. A grande maioria, cerca 50%, deixou a questão sem resposta.

A sétima questão era a respeito de qual seria a explicação para que um corpo massivo não possa atingir a velocidade da luz. Achou-se importante salientar, na própria questão, que apesar de muitos livros darem a explicação para tal impossibilidade utilizando o argumento do aumento da massa (massa relativística), não seria esta a boa resposta de acordo com os conceitos da Relatividade Especial.

Os alunos responderam de duas maneiras: uma utilizando a relação da energia total de um corpo livre (equação (21) do material didático dos alunos), em que se substituiu v por c , com isso o denominador tornando-se nulo, ou seja, seria necessária uma quantidade de energia infinita; a outra forma, também correta, apresentada por muitos alunos, foi apenas descritiva, que, em resumo, consideravam que seria necessária uma quantidade infinita de energia para que um corpo atinja a velocidade da luz.

Mais de 65% dos alunos acertaram esta questão. Um número significativo, próximo aos 25% deixou esta questão sem resposta e o restante do grupo deu uma resposta errada.

As últimas quatro questões eram de resolução de problemas utilizando algumas das equações trabalhadas em aula.

Na questão oito abordamos a dilatação temporal e pedíamos para que o aluno determinasse qual seria o tempo transcorrido para quem permaneceu em Terra (tempo dilatado), de uma viagem realizada por outra pessoa, utilizando velocidades relativísticas. Do total, 75% dos alunos acertaram a questão, realizando o cálculo de forma totalmente correta. Os restantes, 25%, tentaram calcular, mas erraram na matemática ou utilizaram as informações do problema de forma incorreta, confundindo tempo próprio com tempo dilatado.

A nona questão foi sobre a contração do espaço. Pedíamos comprimento medido para quem estava em movimento, ou seja, o comprimento contraído. Cerca de 63% dos alunos responderam de forma correta. O restante, assim como na questão oito, errou na interpretação do problema ou ao realizar o cálculo.

A décima questão abordou a adição de velocidades, dividida em três itens. No item a, pedimos um cálculo utilizando a Relatividade galileana. Nesse item, mais de 90% dos alunos acertaram. No item b pedimos que calculassem uma velocidade relativa, utilizando a relação de Einstein. Aqui, cerca de 60% calcularam de forma correta. Muitos, apesar de utilizarem a relação correta, atrapalharam-se no cálculo. E o último item indagava por que não poderíamos utilizar como resultado a resposta dada pela Relatividade galileana. Cerca de 90% dos alunos responderam corretamente esta questão. É importante salientar que muitos que erraram o item b responderam de forma correta ao item c.

No último problema, deu-se uma abordagem mais prática a respeito da energia relativística. Perguntava-se quantas residências poderiam ser alimentadas durante um mês com a conversão em energia de uma massa de 1 kg. A maior dificuldade apresentada pelos alunos foi a transformação de unidades, ou seja, não conseguiram determinar qual era o consumo de energia de uma residência em joules, durante um mês. Apenas 42% dos alunos conseguiram chegar ao resultado correto. Muitos calcularam de forma correta a equivalência em energia de um 1 kg de massa, mas não conseguiram determinar o número de residências que poderiam ser abastecidas por esta quantidade de energia.

5.4. Considerações finais

Percebemos, ao final da aplicação da proposta, uma mudança significativa nos subsunçores dos alunos, tanto no que diz respeito a questões de conhecimento geral da Física como, por exemplo, a mudança do paradigma da existência do método científico, como nos conceitos da Relatividade Especial. Apesar da dificuldade em mudar o conhecimento que os alunos já possuíam, como o de tempo, após a aplicação do material conseguimos perceber que para a grande maioria dos alunos ocorreu uma mudança nos seus subsunçores, tornando-se estes mais abrangentes.

Conseguimos perceber a mudança conceitual nos alunos através do questionário aplicado antes e após o projeto, após a avaliação por prova e, principalmente, por meio das discussões ocorridas em sala de aula.

6. DEPOIMENTOS

6.1. Transcrição de depoimentos

Transcrevemos, a seguir, alguns dos relatos escritos oriundos das entrevistas realizadas com os alunos das turmas nas quais o projeto foi aplicado. Essas entrevistas foram realizadas após o término dos trabalhos e aplicação da prova. Os alunos foram livres para fornecer ou não seus depoimentos. Procuramos mantê-los na íntegra, sendo que as manifestações encontram-se em itálico.

Pedimos para que os alunos, em seus depoimentos, destacassem o que mais lhes chamou a atenção e suas maiores dificuldades para a compreensão do conteúdo.

Alunos do Colégio Cenecista Carlos Maximiliano:

Guilherme

“Essa matéria é uma viagem. Foi muito legal a parte histórica, porque gosto de história e pretendo fazer história. O mais difícil é entender por que o tempo não passa igual para todo mundo. Mas acho que entendi.”

Tiago 1

“Já havia lido na internet e na Super Interessante alguma coisa sobre Teoria da Relatividade e não tinha entendido nada. Mas agora consegui compreender. A maior dificuldade que tive foi de entender por que não há paradoxo dos gêmeos.”

Bianca

“Tudo nessa matéria é relativo, então dizer que entendi também é relativo dizer que foi fácil ou difícil é relativo.”

Gustavo

“Muito boa a forma como o professor desenvolveu o conteúdo utilizando apresentação com a televisão. Acredito que desta forma é mais fácil para o entendimento do conteúdo.”

Quanto a matéria sempre tive interesse por assuntos como este de relatividade (que é uma viagem), achei mais interessante que muitas matérias que aprendi em física.”

Felipe

“ O material que o professor passou para nós é bem completo, pois estive comparando com o da apostila e nesta tem apenas três páginas e fala de massa relativística. Não entendi muito bem como que eu vou converter massa em energia.”

Barbara

“Achei interessante esta matéria, mas é difícil de entender porque não conseguimos observar essas coisas.”

João Paulo

“Esse conteúdo foi um dos que eu mais gostei, porque é muito diferente de como estamos acostumados em nosso dia-a-dia, e as aulas também foram bem divertidas e diversificadas.”

Natália

“No início nem parecia ser física, era história, mas depois consegui entender o porque dessa parte histórica, é que a física sempre evolui e não é desenvolvida de forma independente.”

Gabriela

“Na minha opinião as aulas de física foram muito boas, bem diferente do que estamos acostumados com todas as disciplinas. A maior dificuldade foi entender quem aumenta e quem diminui o seu comprimento.”

Tiago 2

“Achei legal a explicação de por que não há um método científico, eu achava que quando um cientista fosse fazer qualquer coisa, sempre a primeira coisa era a observação. O mais difícil do conteúdo foi a prova.”

Alunos da Escola Técnica Municipal Farroupilha:

Vinicius

“As aulas foram bem elaboradas, bem preparadas, em que conseguimos verificar a evolução da ciência. Agora o mais difícil foi aceitar esse negócio de tempo diferente.”

Tainã

“Na minha opinião esse conteúdo é bem complexo, mas o professor buscou demonstrar que não é tão difícil. A dificuldade é que o tempo não é igual, que depende do lugar em que eu estiver.”

Diego

“Não achei esse conteúdo chato, bem pelo contrário, é interessante. Outra coisa boa desse conteúdo é que possui poucas fórmulas.”

Cristiane

“As aulas com a utilização da televisão para apresentar os slides foram bem mais dinâmicas. Gostei da parte histórica, pois consegui entender como foi o crescimento da física.”

Bernardo

“Eu acho que da forma com foram trabalhadas as aulas de física foi bem melhor, não foi somente aquele monte de cálculos, gostei da parte teórica, claro da matemática nem tanto. O mais difícil foram os cálculos.”

Rafael

“Sempre aprendi que tinha um método científico, mas com os exemplos que o professor deu em aula vejo que não há uma receita de se fazer ciência. Não achei nada difícil.”

Gabriel

“Achei estranho ter poucas fórmulas, pois todos os conteúdos de física é sempre um monte de fórmulas, mas é bem mais fácil assim, porque aprendi o conceito e não apenas a fazer contas.”

Leonardo

“Sempre gostei de física, mas depois desse conteúdo cheguei a conclusão que vou fazer física na faculdade. Essa matéria de Relatividade é muito legal. Quero saber mais sobre isso, como que pode ser as viagens no tempo.”

Láise

“Já li uma reportagem que saiu na Super, mas não consegui entender o significado. Após as aulas de física sobre relatividade ficou bem mais claro que o tempo é relativo porque depende do referencial que adotarmos. Não tive nenhuma dificuldade com os conceitos.”

Carla

“Gostei do polígrafo que o professor passou, ele é muito interessante e auxiliou bastante na aula, pois com esse material não precisei ficar copiando as aulas e pude prestar mais atenção nas aulas. É um pouco complicado de entender, ou aceitar esse negócio de tempo relativístico.”

6.2. Considerações finais

Podemos perceber através dos depoimentos que não é impossível e nem fora da realidade do nosso contexto escolar desenvolver o conteúdo de Relatividade Especial. O que se depreende dos depoimentos é que uma abordagem simples, como a que demos ao material do aluno, pode trazer significados para a Relatividade Especial.

Verificamos em vários depoimentos que um dos nossos objetivos, que era o de demonstrar que não há um método científico, foi bem absorvido pelos alunos. O fato de a parte histórica ter sido citada por vários alunos demonstra que estes possuem interesse em conhecer a evolução do conhecimento científico.

E, finalmente, é observado através de alguns depoimentos que os alunos estão acostumados com uma Física que é um amontoado de fórmulas sem muito significado para eles. Da maneira como abordamos o conteúdo, com ênfase nos aspectos conceituais, os alunos chegam a se surpreender com a simplicidade de alguns conceitos físicos.

7. ANÁLISE DE LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO

7.1. A análise realizada

A partir da década de 80, começou-se a buscar a introdução dos conteúdos de Física Moderna no ensino médio. Esta preocupação intensificou-se a partir do estabelecimento dos novos Parâmetros Curriculares Nacionais [11], que exigem que o aluno deve ter conhecimento dos fenômenos naturais do mundo que o rodeia, com atenção para a Física Moderna e Contemporânea, essencial para a compreensão dos conceitos básicos envolvidos na tecnologia moderna, na cosmologia, etc.

Diante dessa busca de atualização dos conteúdos, vários são os autores que estão incluindo um capítulo, ou apenas uma seção, para o ensino da Relatividade Especial em seus livros didáticos de Física.

Realizamos uma análise da maneira como vêm sendo abordados os conceitos da Relatividade Especial em alguns livros didáticos nacionais do ensino médio. Detivemo-nos em alguns assuntos que consideramos fundamentais para o ensino da Relatividade, como a gênese da Relatividade Especial, simultaneidade, dilatação temporal, contração do espaço e energia relativística.

A primeira obra analisada foi *As faces da Física*, de Carron e Guimarães [14]. O livro dedica sete páginas para a abordagem de todo o conteúdo da teoria da Relatividade. Não faz referência à Relatividade galileana, e não há uma abordagem histórica da gênese da Relatividade Especial, desta forma não deixando claro qual foi o ponto de partida que Einstein utilizou para a elaboração da Relatividade Especial.

Quanto aos postulados, são apresentados de forma bem clara, seguida por comentário das conseqüências que ocasionaram.

A relação matemática da dilatação temporal é obtida através da experiência de pensamento do que muitos chamam de trem de Einstein. Após, é feito o comentário de que para velocidades muito pequenas não percebemos a dilatação temporal. A contração do

espaço também é obtida através de um exemplo, utilizando a relação obtida anteriormente para dilatação do tempo.

A idéia de massa relativística é apresentada ao leitor, na seção *Dinâmica relativística*, apesar dos autores comentarem que alteração na inércia de um corpo não significa alteração da quantidade de matéria do corpo. Um dos exemplos resolvidos aborda a idéia de massa relativística. É apresentada uma expressão para energia relativística, contendo a anteriormente mencionada massa relativística. Não é apresentado nenhum exemplo de energia relativística e nem um tratamento adequado da equivalência massa-energia, sendo apenas apresentada a fórmula matemática.

Não é mencionada a questão da simultaneidade, da adição de velocidades, nem tampouco os paradoxos surgidos com a Relatividade Especial.

Outro livro analisado foi o *Física Ciência e Tecnologia*, de Ferraro, Penteadó e Torres [47]. Os autores apresentam um capítulo inteiro, com 23 páginas dedicadas à Relatividade Especial.

Consideramos que este livro possui uma boa abordagem histórica. Apresenta os fatos mais relevantes do final do século XIX, os conflitos surgidos nesta época, principalmente o das equações de Maxwell. O autor recorda a relatividade galileana e newtoniana, dentro deste contexto da construção da Relatividade Especial.

Podemos destacar que a obra descreve muito bem as tentativas de Michelson e Morley em detectar o éter através do interferômetro. Mas, o mais importante é que a autora aborda a questão dos resultados conflitantes no uso das equações de Maxwell, quando da mudança de um referencial inercial para outro referencial inercial, utilizando as transformações de Galileu, o que ensejou o início da elaboração da teoria Relatividade Especial. O comentário é apresentado de uma forma bastante precisa e acessível a alunos do ensino médio.

Os dois postulados são apresentados de forma bastante clara, e são citados exemplos de suas conseqüências.

A dilatação temporal é apresentada e é obtida a equação correspondente, através de uma dedução bastante simples (semelhante à que utilizamos no texto dos alunos). São apresentados dois exemplos, para ilustrar a dilatação temporal.

A contração do espaço é muito bem abordada, e se enfatiza que não há um encurtamento estrutural, mas sim uma contração real mas não material. O autor, ao comentar um exemplo resolvido, diz: *evidentemente a plataforma não encolheu; essa aparente contração no seu comprimento é consequência do movimento relativo entre o observador e o objeto medido*. Também é salientado que a contração ocorre no mesmo sentido do deslocamento.

Para o conceito de energia relativística, também é apresentada uma boa abordagem, em que se utiliza, de forma correta, os termos de energia de repouso, referindo à energia do corpo quando este está em repouso, e energia relativística, que é associada à energia total do corpo. Porém, achamos que se poderia descrever melhor o princípio da equivalência massa-energia.

A adição de velocidades é tratada cotejando-se o formalismo de Galileu. A simultaneidade também é bem abordada. Os autores também abordam o efeito Doppler relativístico. Ao final, é dada uma rápida introdução à teoria da Relatividade Geral. Ao total, são 28 exercícios distribuídos pelo capítulo.

É importante salientar que em momento algum o autor introduz a idéia de massa relativística, algo raro entre os livros de Física do ensino médio.

É um bom livro para se utilizar para o ensino da Relatividade Especial.

A terceira obra analisada foi *Física* de Alberto Gaspar [19]. O conteúdo de Relatividade Especial encontra-se no terceiro volume da série, onde lhe são dedicadas 27 páginas.

O autor apresenta uma boa abordagem histórica, salientando os conflitos do final do século XIX. Utiliza uma página inteira para uma curta biografia de Albert Einstein. Faz referência às transformações de Galileu, utilizando exemplos e exercícios, o que consideramos positivo, para uma futura comparação com a Relatividade Especial. Também, é dada toda uma ênfase à necessidade que se tinha em se determinar a existência do éter, descrevendo de forma detalhada o experimento de Michelson e Morley e salientando a interpretação dada por estes dois para a contração do comprimento.

Consideramos de grande relevância a abordagem a respeito da inconsistência das equações de Maxwell com a Mecânica newtoniana, que deu origem à teoria da Relatividade Especial.

Os dois postulados são abordados de forma clara, como uma consequência natural dos fatos do final do século XIX, sendo que para cada um é feita uma descrição das suas principais consequências.

A dilatação temporal é abordada como uma consequência do segundo postulado. É apresentada uma figura para representar a experiência de pensamento do trem de Einstein, onde o tempo passa mais devagar para quem está dentro do trem e mais rápido para quem está fora. A equação da dilatação temporal é apresentada sem que seja feita qualquer dedução. Apenas são explicados os significados de cada termo da equação.

Apesar do livro dar uma boa abrangência ao assunto de Relatividade Especial, é impressionante a forma como é apresentado o conceito de contração do espaço. É dedicado apenas um parágrafo, seguindo-se alguns exemplos, sem maiores explicações. Para o leitor, fica nítida a sensação de que há uma diminuição do comprimento material no sentido do deslocamento. Em nenhum momento é ressaltado que esta contração decorre diretamente da escolha do referencial em que está sendo realizada a medida. Na página 311, faz um comentário sobre a interpretação de FitzGerald para a contração, mas frustra o leitor ao não continuar tratando o tema. O comentário é o seguinte: *Embora a fundamentação teórica dessa contração não tenha sido correta – na verdade ela era apenas um artifício para justificar o fracasso na detecção do éter-, a expressão é válida e está incorporada à Teoria da Relatividade Restrita.* O autor termina o parágrafo sem mais explicações.

A obra apresenta a definição de quantidade de movimento relativística e, a partir daí, obtém a expressão relativística da massa de um corpo. Na página 319 é apresentado um gráfico da razão entre a massa relativística e a de repouso, em função da velocidade, onde o autor coloca: *Observe que, para velocidade $1,0c$, a massa tende para o infinito.*

Em um quadro chamado *discussão*, também na página 319, o autor comenta que um dos maiores físicos do século XX, Richard Feynman, faz a seguinte afirmação: *“isso é tudo o que se precisa saber sobre a Teoria da Relatividade – as leis de Newton são modificadas, introduzindo-se um fator de correção para a massa”.* Ao final, o autor comenta que atualmente muitos físicos desconsideram a existência do conceito de massa relativística, utilizando apenas o conceito de quantidade de movimento relativístico. E cita que o próprio Einstein teria afirmado que a relatividade da massa “não foi uma boa idéia”.

O conceito de energia relativística é inicialmente apresentado, referindo-se aos conceitos clássicos de energia. Apresenta o conceito relativístico de energia, como uma consequência da massa relativística. Mas, ao final, o autor faz um comentário da equivalência massa-energia descrevendo, de forma bastante própria para o ensino médio, essa relação.

O autor aborda, utilizando exemplos apropriados, o conceito de simultaneidade, onde chega a citar uma aplicação da relatividade da simultaneidade em nosso cotidiano na página 313. Apresenta a relatividade das velocidades fazendo uma comparação com a relatividade galileana e resolve um exemplo sobre adição de velocidades. Na página 321 o autor apresenta uma conclusão da Relatividade Especial, voltando a citar a massa relativística dos corpos, colocando que a massa dos corpos tende para o infinito quando se aproxima da velocidade da luz. O autor insiste no conceito de massa relativística, como sendo uma consequência da Relatividade Especial. Nesta conclusão volta a destacar que o comprimento se reduz na direção do movimento, mas não coloca que esta é uma redução aparente devida à escolha do referencial.

No total, o livro propõe 13 exercícios, dentre os quais alguns estão relacionados com massa relativística, reafirmando a posição do autor com relação a este assunto.

São dedicadas quatro páginas à Relatividade Geral, em que é apresentado o conceito da curvatura espaço-tempo.

O outro livro de Gaspar [20], *Física*, possui uma seção relacionada à Relatividade Especial, porém de maneira bem mais resumida que o livro *Física* volume 3, deste mesmo autor. Nesta obra o autor utiliza o capítulo 36 para falar sobre toda a Física Moderna. Para a teoria da Relatividade Especial, são reservadas uma seção com quatro páginas, em que são abordados os conceitos de simultaneidade, contração do espaço, dilatação temporal, massa relativística e energia. Porém, adição de velocidades, e introdução à Relatividade Geral não são abordados nesta obra, diferentemente de sua outra obra [19].

O autor apresenta apenas um comentário sobre a interpretação dada por FitzGerald para a contração do comprimento. Não aborda qualquer conflito surgido ao final do século XIX. Enfim, apresenta direto os conceitos da Relatividade Especial sem se preocupar com a construção deste conhecimento.

Os dois postulados são abordados de forma direta apenas com um pequeno comentário sobre o éter.

A dilatação temporal é abordada como uma consequência do segundo postulado e é apresentada uma figura para representar a experiência de pensamento do trem de Einstein, onde o tempo passa mais devagar dentro do trem e mais rápido para quem está fora. A equação da dilatação temporal é apresentada sem que seja feita qualquer dedução. Apenas são explicados os significados de cada termo da equação.

A abordagem da contração do espaço é feita somente no início, onde o autor apresenta a interpretação dada por FitzGerald, e um pequeno comentário para introduzir o conceito de massa relativística, onde coloca: *Assim como o comprimento se contrai e o tempo se dilata, a massa se dilata...* Não é apresentado qualquer comentário sobre a interpretação dada por Einstein sobre a contração do espaço.

Nesta obra Gaspar aborda o conceito de massa relativística de forma totalmente direta, diferentemente de sua outra obra que, para justificar tal conceito, utiliza o conceito de momentum relativístico. Dá uma ênfase toda especial a este conceito, o qual justifica a impossibilidade de se atingir a velocidade da luz, porque quando um corpo se aproxima de tal velocidade a sua massa tenderia para o infinito. Esta impossibilidade é representada graficamente pela razão entre a massa relativística e a massa de repouso em função da velocidade, onde tal razão tende para o infinito à medida que a velocidade do corpo se aproxima da velocidade da luz. Assim como em sua outra obra, existe um pequeno quadro no qual refere que muitos autores não consideram o conceito de massa relativística, apenas o conceito de momentum relativístico.

O conceito de energia relativística é abordado da mesma forma como é abordado em sua outra obra [19]. Apresenta-o como uma consequência da massa relativística; porém, explica o princípio da equivalência massa-energia.

É importante salientar que não há nenhuma resolução de exercícios, para ilustrar a aplicação dos conceitos da Relatividade Especial.

Outro livro de bastante utilização, principalmente em escolas públicas, é *Física*, de Silva (Paraná) [43]. O autor dedica seis páginas para a Relatividade especial.

A obra começa abordando os conflitos existentes ao final do século XIX. Descreve, de forma resumida, a busca do éter. Tece um rápido comentário sobre o problema com as equações de Maxwell, mas não descreve qual era o conflito existente.

Os dois postulados são apresentados sem grandes comentários, sem que seja feita qualquer referência às suas conseqüências.

Este livro apresenta um tópico sobre simultaneidade, que é abordada utilizando um exemplo do cotidiano: ao assistir jogos ao vivo, vemos as imagens da televisão com uma diferença de tempo em relação aos torcedores que estão dentro do estádio.

A dilatação temporal é abordada inicialmente utilizando como exemplo o filme *O Planeta dos Macacos*. Apresenta um desenho ilustrativo, com a representação da experiência de pensamento de Einstein. Porém, não faz nenhuma dedução para chegar à equação da dilatação temporal, apenas esta é apresentada na sua forma final.

Quanto à contração do comprimento, o autor dedica apenas um parágrafo, onde apresenta a equação da contração do comprimento, especificando cada termo. Não faz qualquer comentário sobre a contração do comprimento não ser uma diminuição material, mas sim um encurtamento devido às medidas realizadas em diferentes referenciais.

Em um outro tópico o autor inicia apresentando momentum relativístico para justificar a expressão de massa relativística. E justifica da seguinte maneira: *Comparando a expressão relativística da quantidade de movimento com a clássica, obtemos a expressão da massa relativística (m).*

E segue: *Da análise dessa expressão, chegamos à conclusão de que corpos com massa não podem atingir a velocidade da luz, pois sua massa seria infinita, fato que não possui significado físico.*

Ao final do capítulo o autor coloca uma chamada – Você sabia? – na qual comenta que alguns autores não utilizam mais o termo massa relativística, apenas quantidade de movimento, isto porque as experiências mostram apenas variação na quantidade de movimento.

Ao final do capítulo é acrescentado o conceito de energia relativística, utilizando o conceito de massa relativística. Não faz qualquer comentário sobre a equivalência entre massa e energia, o que era de se esperar sobre esta equação. Percebe-se que o autor apresenta o conceito de energia relativística como uma conseqüência da massa relativística.

Não é apresentado qualquer paradoxo surgido com a Relatividade Especial. E são propostos apenas cinco exercícios, dentre os quais dois são sobre massa relativística.

A obra *Imagens da Física*, de Amaldi [1], dedica um capítulo com seis páginas à teoria da Relatividade Especial.

O autor inicia o capítulo destacando a Física do final do século XIX, enfatizando o trabalho de Maxwell com o Eletromagnetismo. Citando os conflitos com a Física Clássica, o autor comenta o da constância da velocidade da luz, independente do referencial inercial, e chega a citar um exemplo, para confrontar com o que estamos habituados. Porém, o autor escreve que “*Einstein partiu da observação experimental de que a velocidade das ondas eletromagnéticas é a mesma em todas os sistemas de referência*”, dando a entender que a elaboração da teoria da Relatividade Especial partiu daí.

Não são apresentados os postulados de Einstein, porém, são realizados comentários sobre as conseqüências da Relatividade Especial, como a relatividade da simultaneidade e do tempo. Dilatação temporal, contração do comprimento e adição de velocidades também não são apresentados, apenas um pequeno comentário em um exemplo da dilatação do tempo, mas não é apresentada nenhuma das equações (dilatação do tempo, contração do espaço e adição de velocidades).

O princípio da equivalência massa-energia, possui uma boa abordagem, onde o autor chega a citar “*a massa é uma forma de energia, pois ela pode surgir contanto que desapareça energia, e vice-versa*”. O conceito de massa relativística não é apresentado de forma direta, mas podemos verificar que o autor utiliza este conceito, pois em um parágrafo apresenta a equação $E = m.c^2$, e no parágrafo seguinte deparamo-nos com o conceito de energia de repouso, apresentado na forma $E_0 = m_0.c^2$. Não é feito nenhum comentário a respeito da diferença entre m e m_0 , estando dessa forma implícito o conceito de massa relativística.

Também não é feito comentário sobre qualquer paradoxo associado à Relatividade Especial.

Outra obra analisada foi *Física 3*, de Cabral e Lago [12] que contém uma seção com dez páginas dedicadas à Relatividade Especial. Faz breve comentário sobre os

conflitos surgidos no final do século XIX, principalmente na página 512, em que descreve a busca da identificação do éter por Michelson e Morley. Ao final da página comenta o insucesso na identificação do éter e acrescenta que, devido a isso, “*As portas do caminho para a formulação da Teoria da Relatividade Especial estavam abertas*”, induzindo o leitor a pensar que Einstein partiu dos resultados negativos de Michelson e Morley para a elaboração da teoria da Relatividade Especial. Na página 511, os autores citam que no final do século XIX havia inconsistências das leis da Mecânica com as do Eletromagnetismo, levando os cientistas da época a uma situação constrangedora, tendo três alternativas diante deste conflito. A primeira consistia na existência de um referencial absoluto, um referencial privilegiado; a segunda opção deveria considerar as leis do Eletromagnetismo erradas e a terceira que as transformações de Galileu estavam erradas. Einstein considerou correta as equações de Maxwell, modificando dessa forma os conceitos da Relatividade galileana, ou seja, utilizou a terceira opção ao apresentar a teoria da Relatividade Especial em 1905.

Os dois postulados são apresentados de maneira bastante clara, citando-se exemplos de suas conseqüências para as leis da Física, dentre elas as mudanças nos conceitos de simultaneidade, tempo e comprimento. A questão da simultaneidade é apresentada de forma bastante clara, como uma conseqüência do segundo postulado, citando exemplo para ilustrar a relatividade da simultaneidade. A dilatação temporal é abordada de maneira direta, também como conseqüência do segundo postulado, sem que seja feita qualquer forma de dedução para a obtenção da relação da dilatação temporal. Quanto à contração espacial, apenas cita a existência da mesma na página 511, como conseqüência dos postulados, e não faz mais nenhum comentário a respeito e nem fornece exemplos.

Na seção *matéria e energia*, na página 515, é apresentado o conceito de massa relativística, onde se chama atenção para o fato de que a massa depende da velocidade do corpo. Os autores chegam a citar que *Einstein propôs que a massa depende da velocidade: parte da energia que o objeto recebe é utilizada para aumentar a sua velocidade e parte, para aumentar sua massa*. Logo em seguida os autores apresentam a equação da massa relativística, e acrescentam: *Uma partícula para ter a velocidade da luz terá massa infinita*. Na página seguinte, 516, é ilustrado um gráfico de m/m_0 em função de v/c . Os autores definem a equação da energia cinética como sendo $E_c = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2$ e não definem

momentum relativístico. Além disso, o significado da relação massa-energia foi definido como se massa e energia fossem a mesma grandeza.

Não é apresentado nenhum dos paradoxos surgidos com a Relatividade Especial e nem mencionado nada a respeito da Relatividade Geral.

A obra *Temas de Física* de Bonjorno et al [7] apresenta nove páginas dedicadas ao capítulo da teoria da Relatividade Especial. Na introdução do capítulo os autores fazem um breve comentário em um parágrafo a respeito da crise surgida no final do século XIX, onde a Física Clássica não respondia de forma satisfatória. Os autores em nenhum momento citam quais foram os conflitos existentes no final do século XIX, e qual paradoxo levou Einstein a formular a teoria da Relatividade Especial em 1905.

Os dois postulados são apresentados de forma objetiva, citando-se exemplos bem claros de sua aplicabilidade. Ao final dessa primeira parte são apresentados dois exercícios sobre os dois postulados. A dilatação temporal está muito bem abordada, onde utilizam uma experiência de pensamento para a obtenção da relação da dilatação do tempo, buscando estabelecer sempre a diferença entre tempo próprio e tempo dilatado. Porém, os autores apresentam como exemplo da dilatação temporal o paradoxo dos gêmeos, equivocando-se em considerar tanto a nave quanto a Terra como referenciais inerciais. Para a contração do comprimento não é feita nenhuma dedução da relação matemática, sendo esta apresentada de maneira direta. Os autores, referindo-se à contração do comprimento, escrevem: *Uma barra se contrai no sentido de seu movimento, tornando-se cada vez menor à medida que aumenta a sua velocidade em relação ao observador.* Na página 312 apresentam uma figura que mostra como ficaria a imagem de uma esfera à medida que sua velocidade aumenta. Sem maiores considerações pelos autores, o leitor acaba concluindo que a contração que ocorre conforme a equação é uma contração material. Ao final da seção os autores apresentam um exemplo da contração do espaço seguido de quatro exercícios.

A equivalência massa-energia é apresentada sem que seja feito qualquer comentário sobre massa relativística e nem momentum relativístico. Os autores inicialmente apresentam a relação $E = m.c^2$, e logo em seguida $E_0 = m_0.c^2$, sem que seja feita qualquer distinção entre m e m_0 , mas de forma implícita está aí o conceito de massa relativística. Para os autores, *a teoria da relatividade especial mostra que massa nada mais*

é que uma forma de energia. Ao final da seção é realizado um exemplo seguido de três exercícios.

Em nenhum momento os autores comentam a relatividade da simultaneidade, adição de velocidades e Relatividade Geral.

7.2. Comentários finais

Ao analisarmos as obras acima, verificamos que há uma superficialidade destas no que se refere à abordagem da teoria da Relatividade Especial. Estes textos não promovem a necessária ruptura com o senso comum, que a Relatividade Especial exige, como por exemplo, a mudança das concepções galileanas que possuímos sobre tempo e espaço. Em muitas obras a maneira como os conceitos são apresentados acabam por comprometer o real significado da teoria da Relatividade Especial.

Dos livros analisados, dois não fazem nenhuma abordagem histórica, enquanto que os demais preocupam-se principalmente com os conflitos surgidos no final do século XIX, sendo que a maioria deixa a entender que Einstein partiu dos resultados negativos de Michelson e Morley, para a elaboração da Relatividade Especial.

Os autores buscam abordar principalmente a dilatação temporal e a contração do espaço, como conseqüências dos postulados da Relatividade Especial, porém não exploram o assunto de maneira conveniente, principalmente a contração do espaço. Das obras analisadas, apenas uma aborda a contração do comprimento como uma contração visual, enquanto que as demais a consideram como uma contração real.

A idéia da massa relativística não consta apenas em uma obra, em outra é colocada de forma indireta e, nas demais, é citada como sendo a explicação para que o corpo não possa atingir a velocidade da luz. Três obras apresentam um gráfico do aumento da massa em função da velocidade, para ilustrar o conceito de massa relativística.

O princípio da equivalência massa-energia também é abordado de maneira precária, em geral sendo apenas apresentada uma fórmula, sem maiores abordagens do real significado deste princípio.

Trabalho de análise de livros didáticos do ensino médio de Física, quanto à abordagem da teoria da Relatividade Especial, já vem sendo realizado por Ricci e

Ostermann conforme pudemos verificar em dois artigos; o primeiro aborda erros conceituais sobre a contração de objetos conforme a Relatividade Especial [31], e o segundo trata do conceito de massa relativística em livros didáticos [30].

Ademais, outros cinco livros analisados não contêm nada referente à Relatividade Especial, desprezando totalmente a Física do século XX. Estas obras são as seguintes: *Física –Edição Compacta-* de Paraná [42], *Física* de Ueno [48], *Física Completa* [8] e *Física Fundamental* [9] de Bonjorno et al.

É preocupante a forma como vêm sendo abordados, isto quando acontece, os conceitos da Relatividade Especial em livros didáticos. Como verificamos, descuidos conceituais acerca da Relatividade Especial são muito comuns nesses livros. Então, é necessário que os professores estejam alertas quando forem abordar a Relatividade Especial, buscando textos que contenham um maior rigor na linguagem empregada. Sendo assim, há uma necessidade muito grande de textos apropriados para alunos de ensino médio, quanto aos conceitos da Relatividade Especial.

8. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O ensino da Física atualmente está passando por um momento de transição, pois é cada vez mais necessária uma análise de quais conteúdos ensinarmos e de qual a transposição didática que devemos utilizar para termos uma educação científica e tecnológica conforme sugerido pelos PCNs [11]. Assim, temos que ter um currículo, para o ensino médio, que atenda às expectativas e às necessidades para a formação de um cidadão consciente e crítico frente a uma sociedade científica e tecnológica cada vez mais presente em nosso cotidiano. Podemos citar Köhnlein [23]: *Para que a educação científica possa subsidiar o aluno no exercício de uma cidadania consciente e atuante, ela deve ir além do simples ensino-aprendizagem de fatos, leis e teorias científicas. Entre outras coisas, é preciso também proporcionar ao aluno uma compreensão crítica da natureza da ciência e da construção do conhecimento científico.* Então, a Física que devemos trabalhar no ensino médio não pode excluir os conhecimentos adquiridos a partir do início do século XX. Até mesmo porque a maioria dos estudantes terá, como única oportunidade de adquirir conhecimento científico, apenas o ensino médio.

Verificamos que a inserção no ensino médio dos conteúdos da teoria da Relatividade Especial tem sido proposta por vários trabalhos, conforme abordamos na Seção 2.4, mas este processo de inserção não ocorre de imediato, é um processo lento, tanto que encontramos apenas três relatos de aplicação da Relatividade no ensino médio.

Nos próprios livros didáticos de Física para o ensino médio, verificamos que a teoria da Relatividade Especial ocupa um espaço de transição, onde em alguns livros é abordada apenas como um apêndice. Já em outros, diferentemente, ocupa um capítulo. Mas, em geral, encontramos uma carência muito grande na abordagem da Teoria da Relatividade Especial nos livros didáticos do ensino médio, como pode ser verificado no Capítulo 7.

Um dos motivos que dificulta a inserção desse tópico é o despreparo e a resistência ao novo que muitos professores possuem. Arruda [2], em sua tese de doutorado, ao trabalhar com um grupo de professores, que chamou de Grupo de Física Moderna (GFM), ressalta, a respeito da dificuldade e da insegurança apresentada pelos professores para a inserção dos conteúdos de Física Moderna: *em diversas ocasiões os professores manifestaram insegurança quanto à sua formação e, especificamente, dúvidas quanto à*

sua capacidade de tratar tais assuntos. Apesar de várias horas-aula sobre diversos temas de FMC abordados durante os encontros, muitos ainda não se sentiam capazes de desenvolver uma proposta em sala de aula. Podemos verificar que mesmo quando possuem um acompanhamento, como foi o caso do GFM, os professores ainda não se sentem preparados, ou ainda são resistentes ao novo.

Além disso, sabemos que muitos dos professores que ministram a disciplina de Física nas escolas de ensino médio não possuem formação nessa Ciência. Ao contrário, são pessoas com formação nas mais diversas áreas, como Matemática, Biologia, Engenharia, Arquitetura e outras, e que acabam atuando na disciplina de Física pela escassez de professores qualificados para este fim. Para esses professores, a dificuldade é muito maior pois, em sua formação, nada ou muito pouco se viu de Física Moderna como, por exemplo, a teoria da Relatividade Especial. Claro que isso depende muito do professor, pois o profissional que estiver predisposto a mudar e a inserir a Física Moderna no ensino médio, mesmo que lhe falte base, irá buscar aperfeiçoamento. Então, podemos concluir que a falta de conhecimento por parte dos professores é um empecilho para a inserção da teoria da Relatividade Especial no ensino médio. Isto é ilustrado por Arruda [2]: *A formação insuficiente dos professores GFM, de fato, coloca problemas óbvios e elementares, começando pela dificuldade de diferenciar os conteúdos da Física Moderna e os da Física Clássica.*

Mas, para que ocorra a mudança tão necessária para o aperfeiçoamento e qualificação dos professores, é preciso que haja a atualização dos currículos dos cursos de licenciatura em Física, o que já vem ocorrendo em muitas universidades como, por exemplo, na UFRGS. Já para os professores em exercício, restam os cursos de aperfeiçoamento, leitura de periódicos, a participação em encontros científicos e os livros. No entanto, um envolvimento apenas superficial do docente, mesmo que tenha uma visão adequada dos conceitos da teoria da Relatividade Especial, não é garantia de transmissão desses conhecimentos em sala de aula e muito menos de que ele venha a organizar as suas atividades de uma forma diferente da tradicional.

O pleno conhecimento do professor sobre a teoria da Relatividade Especial, ou qualquer outra área da Ciência, não é mais condição suficiente para a atuação no ensino. É necessário, também, ter uma formação em disciplinas como a epistemologia e outras afins. Podemos citar Arruda [2]: *Essa temática não deve ser encarada como uma “perda de*

tempo” pelo professor preocupado com a efetiva aprendizagem do estudante... Em muitos casos, os professores estão mais preocupados com o conteúdo do que com a forma com que estes devem chegar até os alunos. Não que isso seja mais importante que o conteúdo, mas se não houver uma comunicação adequada, no nível de conhecimento do aluno, será em vão o trabalho do professor e, dificilmente, o aluno terá uma aprendizagem significativa. Ser professor não é ter apenas conhecimento do conteúdo, é necessário ter ciência das teorias de aprendizagem e fazer uso delas em sua atuação enquanto docente.

Além dos professores se preocuparem em como devem ensinar, é fundamental que saibam o que ensinar, privilegiando os conceitos que estiverem mais relacionados com o cotidiano dos alunos. Conforme Arruda [2]: *Os conteúdos devem ser reduzidos à sua essência. Ou seja, é preferível tratar dos conceitos fundamentais, do que adicionar informações que estão destinadas a serem esquecidas rapidamente. É mais importante também privilegiar os conceitos e não a parte formal (matemática) das teorias.*

A teoria da Relatividade Especial possui elementos suficientes para dois tipos de abordagem, isto é, disponibiliza ferramentas matemáticas e experimentos suficientes para uma abordagem formal-experimental, assim como possibilita uma reflexão sobre conceitos fundamentais e históricos da Física, se tratada nos moldes histórico-filosóficos.

Na elaboração tanto do texto dos alunos, quanto do material de apoio aos professores, optamos por uma abordagem mais histórico-filosófica. Dessa forma, buscamos dar um enfoque que vise principalmente à parte conceitual, ao invés da formal, pois consideramos que o aluno, tendo conhecimento da parte conceitual, terá a possibilidade de relacionar mais facilmente este conhecimento com alguns fatos de seu dia-a-dia. Além disso, conforme apresentado nas seções 4.1 e 4.2, buscamos elaborar os textos dos alunos e o material de apoio dos professores considerando os principais aspectos das teorias de aprendizagem de Vygotsky, Ausubel e Novak. Sendo assim, no que diz respeito aos aspectos mencionados acima, quanto à dificuldade da inserção da teoria da Relatividade Especial devido à falta de conhecimento e de uma didática adequada, consideramos que os dois textos contemplam essas carências enfrentadas pelos professores.

Outro ponto a ser levado em consideração é o reduzido tempo que os professores possuem para ministrar os conteúdos. Este fator é importante para a seleção dos conteúdos a serem trabalhados. Em nossa seleção, levamos em consideração o ciclo concreto-

abstrato-concreto, conforme Rodrigues [38]. Assim, para a elaboração dos textos, partimos de uma situação historicamente contextualizada (concreto) que foi discutida no plano das idéias (abstrato), possuindo reflexos diretos na vida do aluno (concreto). Desse modo, buscamos organizar os conteúdos em vinte aulas, divididas conforme o Apêndice B.

A abordagem histórica no texto dos alunos propiciou-lhes a construção de um conhecimento mais crítico e abrangente da evolução científica. Contribuiu para desmistificar a figura do cientista como um gênio, que de forma individual descobre toda a sua teoria, omitindo o papel da comunidade científica na construção das teorias.

Sabemos que a Ciência é uma tentativa humana de descrever a realidade, sendo, portanto, um conhecimento provisório e sujeito a modificações. Com a abordagem histórica buscamos ilustrar, nos conflitos do final do século XIX, que este conhecimento é transitório e pode ser modificado por teorias mais abrangentes; que os cientistas e pesquisadores, além de trabalhar com os conhecimentos anteriores, também se utilizam da criatividade e da imaginação na elaboração de uma nova teoria.

Durante as aulas e através dos depoimentos dos alunos, pôde-se verificar a importância que a abordagem histórica teve neste projeto. Acreditamos ter aproximado o aluno da realidade e dos conflitos na transição de uma teoria para outra, e que eles puderam verificar que a Ciência não é algo definitivo e estático, mas sim que evolui. Pudemos verificar a importância dada pelos alunos à abordagem histórica em seus depoimentos como, por exemplo, nestes três trechos que seguem; Guilherme: *Foi muito legal a parte histórica*; Natália: *No início nem parecia ser Física, era história, mas depois consegui entender o porquê dessa parte histórica, é que a Física sempre evolui e não é desenvolvida de forma independente*; Cristiane: *Gostei da parte histórica, pois consegui entender como foi o crescimento da Física*.

A abordagem histórica gerou nos alunos uma certa ansiedade pelo conteúdo que viria, e também uma melhor aceitação e compreensão da teoria. Muitos acharam estranha esta forma de abordar um conteúdo de Física, pois estavam mais acostumados a uma abordagem formal (matemática) ao invés da abordagem histórico-conceitual.

A angústia pela compreensão do conteúdo pôde ser observada principalmente naqueles alunos que já tinham tido, de alguma forma, contato com a teoria da Relatividade Especial em revistas ou *sites*. Como diversos alunos, ao terem contato com essa teoria, depararam-se com abordagens diferentes da que adotamos, isto gerou um certo desconforto

para os alunos. Conforme já comentamos na introdução, a escola deve prescindir destas formas de divulgação, para a formação do subsunçor do aluno.

Quanto ao trabalho em sala de aula com o texto dos alunos, principalmente no que tange ao questionário aplicado antes e após o projeto, vários foram os resultados observados. Apesar de muitos dos conceitos apresentados serem um tanto quanto inusitados, os alunos demonstraram interesse e isso pôde ser muito bem observado nas participações efetivas durante as aulas.

Verificamos que, principalmente com os alunos da Escola Farroupilha, fazia parte de seu subsunçor a existência de um método científico estrito. Ao analisarmos o desempenho dos alunos em aula e, principalmente, pelas respostas dadas ao questionário após o projeto, verificamos que houve uma mudança conceitual significativa, pois os alunos passaram a perceber que não existe uma receita para se fazer uma nova teoria. Ainda podemos ressaltar que eles também passaram a entender a importância do conhecimento de teorias já existentes para a elaboração, construção de uma nova teoria.

Os alunos conseguiram diferenciar a Relatividade de Galileu da Relatividade Especial, mesmo tendo uma certa resistência em aceitar os conceitos da Relatividade Especial devido à dificuldade de observar esta teoria em nosso cotidiano, sendo necessária, dessa forma, uma aprendizagem bastante abstrata. Mas, após a aplicação do material, a mudança conceitual ocorrida com os alunos foi bastante expressiva.

Durante a aplicação do material foi possível constatar que o novo conceito ancorou-se nos conhecimentos já existente nos alunos, modificando, desta forma, os seus subsunçores. Isto, logicamente, deu-se com os alunos que apresentavam uma predisposição em aprender. Podemos exemplificar destacando conceitos de espaço e tempo. A grande maioria dos alunos possuía, neste aspecto, um conhecimento com enfoque newtoniano, onde espaço e tempo são considerados absolutos, invariantes. Mas, após o trabalho em aula, estes conceitos passaram a ser relativos. Os subsunçores de espaço e tempo não deixaram de existir, mas o que ocorreu foi uma modificação dos subsunçores existentes, pois houve interação com o novo conceito, dando uma nova dimensão para o subsunçor existente.

Uma dificuldade que pôde ser observada foi o entendimento da contração do espaço. O maior problema relacionado a este tópico era definir corretamente qual era o comprimento próprio e qual era o comprimento contraído. Quanto à compreensão do que

ocorre (uma decorrência de escolha de referencial, e não uma contração efetiva do material), isto ficou bem claro e pôde ser observado nas considerações feitas pelos alunos em sala de aula.

Outra questão que foi absorvida de forma bastante significativa é a necessidade de uma quantidade infinita de energia para que um corpo possa atingir a velocidade da luz. Alguns alunos já haviam lido ou ouvido reportagens a respeito do assunto, que abordavam a impossibilidade de um corpo atingir a velocidade da luz devido ao aumento de massa. Sendo assim, para esses alunos foi necessária uma atenção especial para que ocorresse, de fato, uma mudança em seus subsunçores.

É importante salientar que alguns alunos demonstraram em suas falas, durante as aulas, que acharam um tanto estranho o conteúdo ter sido apresentado de forma qualitativa, sem muitas fórmulas. Em função destes comentários, podemos dizer que nossos alunos têm uma visão de uma Física que, obrigatoriamente, deve ser apresentada mais como um formulário, do que de forma integrada, com seus conceitos e teorias apresentados como parte da história da civilização.

Outra observação importante é a de que os alunos do Colégio Maximiliano, em geral, possuíam conhecimentos prévios relacionados às questões apresentadas e evidenciavam estas questões de maneira bem mais expressiva que os alunos da Escola Farroupilha. Devemos salientar que a primeira escola é particular, possui laboratório de informática com acesso à internet, uma biblioteca com vários livros atualizados e utiliza o método Positivo de ensino, com apostilas individuais e bimestrais. Já a Escola Farroupilha é pública e somente a partir do segundo semestre de 2004 passou a contar com laboratório de informática, ainda assim, sem qualquer ligação com rede externa e a biblioteca está um tanto quanto defasada. Ainda não há nenhuma adoção de livro texto na Escola Farroupilha, principalmente devido à falta de recursos financeiros por parte dos alunos.

Apesar de ser o mesmo professor a ministrar as aulas de Física em ambas as escolas, as dificuldades que a escola pública apresenta, aliadas ao desinteresse dos alunos, muitas vezes acaba por desmotivar o trabalho, não permitindo a adoção de novas técnicas ou de inclusão de novos conteúdos, como é o caso da Relatividade Especial. No entanto, devemos procurar superar as dificuldades e oferecer uma escola pública de qualidade, principalmente àqueles alunos que contam com esta escola como sua única oportunidade de adquirir algum conhecimento e, ainda, de colocação no mercado de trabalho.

Um outro ponto que foi de extrema importância para o aprendizado dos alunos foram os debates realizados durante o trabalho dos conteúdos e das questões. Com relação a isto, não podemos deixar de citar a teoria de Vygotsky que afirma que não existe aprendizado sem interação. Aqui, especificamente, a interação entre professor e aluno.

Enfim, podemos considerar que, apesar da dificuldade de se aceitar muito dos conceitos apresentados, pouco convencionais, a participação dos alunos foi bastante satisfatória. Por meio de inúmeras perguntas, os alunos evidenciaram a sua dificuldade em aceitar os novos conceitos, tais como dilatação do tempo e contração do espaço. Demonstraram que, de forma geral, interessaram-se pelo assunto, até mesmo mais do que em conteúdos comumente tratados em aula, conforme podemos verificar no comentário do aluno Diego: *Não achei esse conteúdo chato, bem pelo contrário, é interessante*; ou, no comentário do aluno João Paulo: *Esse conteúdo foi um dos que eu mais gostei, porque é muito diferente de como estamos acostumados em nosso dia-a-dia*. Neste ponto, podemos evidenciar o valor da teoria de Vygotsky, que dá importância ao diálogo entre alunos e professores. Com certeza, este diálogo foi fundamental para que o aluno absorvesse o conteúdo que estava em sua zona de desenvolvimento proximal.

O principal resultado deste projeto foi a verificação da possibilidade de se trabalhar no ensino médio a teoria da Relatividade Especial. O texto dos alunos, por nós desenvolvido, atendeu às necessidades dos estudantes. Claro que para a aplicação deste material é necessário que o professor conheça os subsunçores dos alunos e é imprescindível que o professor interaja com eles de uma forma não-unilateral.

Mas, este trabalho também aponta outras necessidades que devem ser pesquisadas quanto à introdução da teoria da Relatividade Especial no ensino médio. A seguir, destacaremos algumas:

- 1- estudar uma proposta e elaborar material didático adequado para a implementação da Relatividade Especial durante os três anos do ensino médio, dividindo o conteúdo de maneira apropriada, bem como sugerir o momento de aplicação de cada um dos conteúdos, não ficando a teoria da Relatividade para ser trabalhada apenas no final do ensino médio;
- 2- fazer um levantamento de quais escolas estão trabalhando os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea, para desta forma termos um conhecimento de onde já há esta implementação e onde há a necessidade de se inserirem

estes conteúdos, bem como incentivar os professores a trabalharem a Física Moderna e Contemporânea;

- 3- elaborar materiais didáticos para todos os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea, com abordagem histórico-conceitual, tendo um texto para os alunos e um material de apoio aos professores;
- 4- análise em livros didáticos de qual a epistemologia adotada, se há o pensamento indutivista, e qual a estratégia utilizada para abordar este conteúdo (histórico, conceitual, formal ou filosófica);
- 5- utilização de filmes relacionados com a teoria da Relatividade Especial. Fazer uma seleção de filmes que possuam relação com os conceitos trabalhados. Esta seleção poderia ser realizada de forma crítica, ou seja, utilizar cenas que estão em desacordo com os conceitos trabalhados. A experiência de utilização de vídeos para o ensino da Física pode ser verificada de maneira positiva na Dissertação de Clebsch [17].

Enfim, espera-se que este trabalho de pesquisa venha a contribuir com aqueles professores que desejam tratar os conteúdos da teoria da Relatividade Especial em sala de aula, utilizando uma abordagem histórica e envolvendo os alunos nas discussões (neste caso, à luz de uma perspectiva histórica e filosófica). Ao mesmo tempo, cabe destacar que este estudo abriu novos horizontes para a pesquisa, enquanto professor, na disciplina de Física, estabelecendo a possibilidade concreta de abordar outros conteúdos sob diferentes enfoques, principalmente o histórico-filosófico, acreditando que as aulas de Física podem e devem se tornar mais interessantes para o aluno.

REFERÊNCIAS

1. AMALDI, U. *Imagens da física*. São Paulo: Scipione, 1995. 537 p.
2. ARRUDA, S. M. *Entre a inércia e a busca: reflexões sobre a formação em serviço de professores de física do ensino médio*. 2001. 230 f. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
3. ARRUDA, S. M. Sobre as origens da relatividade especial: relação entre quanta e a relatividade especial em 1905. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 13, n. 1, p. 32-47, abr. 1996.
4. AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980. 625 p.
5. BARNETT, K. *O universo e o Dr. Einstein*. 3.ed. São Paulo: Melhoramentos, [19_?]. 98 p.
6. BASSALO, J. M. F. Aspectos históricos das bases conceituais das relatividades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 2, p.180-188, jun. 1997.
7. BONJORNO, J. R.; et al. *Temas de física*. São Paulo: FTD, 1997. v. 3.
8. BONJORNO, J. R.; et al. *Física completa*. São Paulo. FTD, 2001. 551 p.
9. BONJORNO, J. R.; et al. *Física fundamental*. São Paulo: FTD, 1999. 672 p.
10. BRASIL. Lei n. 9394, de 20 de dezembro de 1996. *Lei de diretrizes e bases da educação nacional*. Brasília, MEC, 1996.
11. BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio*. Brasília, MEC/SEMT, 1999.
12. CABRAL, F.; LAGO, A. *Física*. São Paulo: Harbra, 2002. v. 3.
13. CAJORI, F. *A history of physics*. New York: Dover Publications, 1962. 424 p.
14. CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As faces da física*. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2002. 742 p.
15. CASTILHOS, M. I. *Uma introdução conceitual à Relatividade Especial no ensino médio*. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
16. CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACÊDO, A. *Física moderna: experimental e aplicada*. 2.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004. 292 p.
17. CLEBSCH, A. B. *Realidade ou Ficção? A análise de desenhos animados e filmes motivando a física na sala de Aula*. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,

- 2004.
18. EINSTEIN, A. *A teoria da relatividade especial e geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999. 136 p.
 19. GASPAR, A. *Física*. São Paulo: Ática, 2002. v. 3.
 20. GASPAR, A. *Física*. São Paulo: Ática, 2003. 496 p.
 21. HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, 1995. v. 4.
 22. HELLMAN, H. *Grandes debates da ciência: dez das maiores contendas de todos os tempos*. São Paulo: Editora UNESPE, 1998. 277 p.
 23. KÖHNLEIN, J. F. K. *Uma discussão sobre a natureza da ciência no ensino médio: um exemplo com a teoria da relatividade restrita*. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Educação) - Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
 24. LANDAU, L; RUMER, Y. *Qué es la teoría de la relatividad*. Moscou: MIR, 1969. 64 p.
 25. MARTINS, R. de A. contribuição do conhecimento histórico ao ensino do eletromagnetismo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 5, p. 49-57, jun. 1988. n. especial.
 26. MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: Ed. Pedagógica e Universitária, 1999. 195 p.
 27. MOREIRA, M. A. *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999. 130 p.
 28. NOVAK, J. D. *Uma teoria da educação*. São Paulo: Pioneira 1981. 225 p.
 29. OLIVEIRA, M. K. de. *Aprendizado e desenvolvimento - um processo histórico*. 4.ed. São Paulo: Scipione, 1997. 111 p.
 30. OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 83-102, abr. 2004.
 31. OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-FitzGerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 2, p. 176-190, ago. 2002.
 32. OSTERMANN, F. *Tópicos de física contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de física*. 2000. 162 f. Tese (Doutorado em Ciências) -

- Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
33. PIETROCOLA, M. *Ensino de física – conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora*. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001. 236 p.
 34. REGO, T. C. *Vygotsky: uma perspectiva histórico-cultural em educação*. Petrópolis: Vozes, 1999. 138p.
 35. RESNICK, R. *Introdução à relatividade especial*. São Paulo: Polígono, 1971. 242 p.
 36. RICCI, T. F. *Teoria da relatividade especial: física para secundaristas*. Porto Alegre: Instituto de Física-UFRGS, 2000. 36 p.
 37. ROCHA, J. F. M. (Org.). *Origens e evolução das idéias da física*. Salvador: EDUFBA, 2002. 374 p.
 38. RODRIGUES, C. D. O. *Inserção da teoria da relatividade no ensino médio: uma nova proposta*. 2001. 163 f. Dissertação (Mestrado em Educação) Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
 39. SANTOS, C. A. dos. *Teoria da relatividade*. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/einstein>. Acesso em: 23 maio 2005.
 40. SAWICKI, Mikolaj. What's wrong in the nine most popular texts. *The Physics Teacher*, College Park, v. 34, n. 3, p. 147-149, Mar. 1996.
 41. SCHWAB, J. *The practical 3: translation into curriculum*. Chicago: School Review, 1973.
 42. SILVA, D. N. *Física*. São Paulo: Ática, 2003. 312 p.
 43. SILVA, D. N. *Física*. São Paulo: Ática, 2003. 400 p.
 44. SERWAY, R. A; JEWETT JR., J. W.. *Princípios de física*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005. v. 1.
 45. TERRAZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.
 46. THUILLIER, Pierre. *De Arquimedes a Einstein: a face oculta da investigação científica*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994. 260 p.
 47. TORRES, C. M. A.; et al. *Física: ciência e tecnologia*. São Paulo: Moderna, 2001. 665 p.
 48. UENO, P. *Física*. São Paulo: Ática, 2005. 416 p.
 49. VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. 5.ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994. 191 p.

Apêndice A

Relatividade: a passagem do enfoque galileano
para a visão de Einstein

Professor Jeferson Fernando de Souza Wolff

Sumário

| | |
|---|-----|
| 1. Introdução | 107 |
| 2. Histórico | 108 |
| 2.1. A Relatividade galileana..... | 108 |
| 2.1.1. Transformações galileanas | 111 |
| 2.2. Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos | 114 |
| 2.3. O Eletromagnetismo..... | 116 |
| 2.3.1. A Eletricidade | 116 |
| 2.3.2. O Magnetismo..... | 118 |
| 2.3.3. Eletromagnetismo – a unificação..... | 118 |
| 2.3.4. O Eletromagnetismo e Maxwell | 120 |
| 2.3.5. Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica clássica | 121 |
| 2.4. Einstein e a origem da Relatividade Especial..... | 123 |
| 3. Relatividade da simultaneidade | 125 |
| 4. Dilatação temporal | 128 |
| 5. Contração do espaço | 134 |
| 5.1. Contração de Lorentz - FitzGerald | 135 |
| 6. Adição de velocidades na Relatividade Especial | 138 |
| 7. Energia relativística | 141 |
| 8. Paradoxo dos gêmeos | 144 |
| 9. Teoria da Relatividade Geral | 146 |
| Referências | 147 |

1. INTRODUÇÃO

A história do pensamento humano mostra a constante busca de teorias que possam descrever, da forma a mais coerente possível, o nosso cotidiano. Desde a Antigüidade, a humanidade busca respostas para muitas questões, até mesmo para a nossa própria existência.

Durante mais de dois séculos, as teorias desenvolvidas por Isaac Newton não foram contestadas, pois descreviam de maneira satisfatória os fenômenos da Natureza, chegando-se a ponto de, no final do século XIX, afirmar-se que não havia nada mais de novo a ser desenvolvido, “descoberto”.

Concepções simplistas apresentam estudiosos como Galileu, Newton e Einstein, como gênios que desenvolveram todas as suas teorias de forma independente. Realmente, estes cientistas elaboraram teorias que contribuíram muito para a evolução da humanidade. No entanto muitos livros, em apresentações simplificadas, deixam a idéia de que suas “descobertas” ocorreram a partir apenas de observações, ou por pura casualidade, sem nenhuma conexão com teorias já previamente existentes.

Outra idéia errada que nos é transmitida é a de que a aceitação de cada nova teoria pela comunidade científica ocorreu, em geral, sem grandes polêmicas.

Buscamos, através do presente texto, comentar a evolução das idéias científicas, enfatizando os caminhos que foram percorridos até a elaboração da Teoria da Relatividade.

2. HISTÓRICO

A seguir, faremos uma breve descrição dos principais fatos que levaram Albert Einstein à elaboração da Teoria da Relatividade Especial (ou Relatividade Restrita). Note que, ao descrevermos esses fatos, existe uma seqüência: a cada desenvolvimento de um novo conhecimento foi necessário que se conhecesse o que já havia sido desenvolvido até a época.

Temos que considerar que pessoas como Galileu, Newton, Maxwell e Einstein foram grandes gênios que contribuíram muito para o desenvolvimento do conhecimento humano. Porém, suas teorias não foram formuladas de forma totalmente independente. Nenhuma descoberta ocorreu de uma hora para outra. Muito pelo contrário. O conhecimento dos fenômenos da Natureza passou e ainda passa por uma constante evolução, onde em cada nova teoria que surge temos contribuições das teorias anteriores.

Isto é o que tentaremos descrever: que a gênese da Teoria da Relatividade Especial começou muito tempo antes de Albert Einstein.

2.1. A Relatividade galileana

O homem sempre procurou entender melhor o mundo que o cerca, a Natureza. A busca para entender o movimento dos corpos já aparece antes de Cristo. A evolução da descrição do movimento dos corpos em relação a outros, em movimentos uniformes ou acelerados, teve seu início com o filósofo grego Zenão, de Eléia (500 – 451 a.C.), estendendo-se até os trabalhos de Albert Einstein, em 1905, com a Teoria da Relatividade Especial.

Zenão considerava que se dois bastões (A e B) se deslocassem com velocidades iguais em intensidade, porém de sentidos opostos em relação a um terceiro bastão C, mantido fixo, um observador em A (ou B) mediria a velocidade do bastão em B (ou A) como duas vezes maior do que a medida por C. Zenão concluiu que este movimento era impossível, passando a chamá-lo de paradoxo dos bastões em movimento.

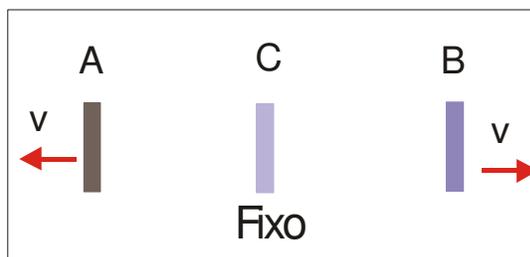


Figura 2

Um observador em A irá perceber que o bastão C se afasta com uma rapidez v e o bastão B com uma rapidez $2v$.

Outro filósofo a procurar descrever o movimento dos corpos foi o grego Aristóteles, nascido provavelmente em 384 a.C. Suas idéias permaneceram aceitas por mais de vinte séculos.

Segundo Aristóteles, a matéria era composta basicamente de quatro elementos terrestres: fogo, ar, água e terra. Estes elementos tinham posições determinadas no Universo, chamadas lugares naturais. O lugar natural do fogo era acima do lugar natural do ar que estava acima do lugar natural da água, por sua vez acima do lugar natural da terra. Deste modo, explicava por que uma pedra e a chuva caem: seus lugares naturais eram terra e água. Analogamente, a fumaça e o vapor sobem em busca de seus lugares naturais acima da terra. Aristóteles também elaborou várias outras teorias sobre ciências naturais, que foram aceitas até a Renascença. Dentre elas, podemos destacar o modelo geocêntrico (Terra como centro do Universo).

Somente nos séculos XVI e XVII é que o pensamento aristotélico começou a ser contestado mais veementemente, principalmente no que diz respeito à idéia do geocentrismo. A descrição dos movimentos passou a ser analisada de maneira mais matemática, e não apenas filosófica como era a descrição aristotélica.

Assim, a dificuldade em entender o movimento dos corpos permaneceu até os séculos XVI e XVII com Giordano Bruno (1548 – 1600) e Galileu Galilei (1564 - 1642) que deram respostas ao paradoxo dos corpos em movimentos relativos (Zenão), utilizando relações matemáticas e não apenas respostas filosóficas como as dadas por Aristóteles.

Galileu Galilei foi o primeiro grande gênio da Ciência moderna e o primeiro homem que observou o céu com um telescópio, aderindo entusiasticamente ao sistema heliocêntrico proposto por Copérnico, o que, aliás, lhe custou muitos contratempos. Além

da discussão do movimento planetário, Galileu contribuiu muito para o desenvolvimento da Mecânica, estabelecendo as leis da queda livre de um corpo e introduzindo o método experimental em Física.

Galileu utilizou o princípio da relatividade dos movimentos, ou princípio da independência dos movimentos, para demonstrar a trajetória parabólica dos projéteis. Consideremos o seguinte exemplo: um projétil lançado a partir do solo com um certo ângulo de lançamento pode ter seu movimento decomposto em dois movimentos independentes: um horizontal e outro vertical. No lançamento de um projétil verticalmente para cima, sobre uma plataforma em movimento retilíneo e uniforme, um observador que esteja sobre a plataforma em movimento verá a trajetória do projétil como retilínea de ida e volta. Quanto a um observador que esteja parado no solo, onde a plataforma está em movimento, visualizará a trajetória do projétil como parabólica. Assim, cada observador terá uma visão diferente do movimento. Com isso, Galileu conseguiu resolver o paradoxo de Zenão, mostrando que a trajetória e velocidades são dependentes do referencial de onde se observa o movimento.

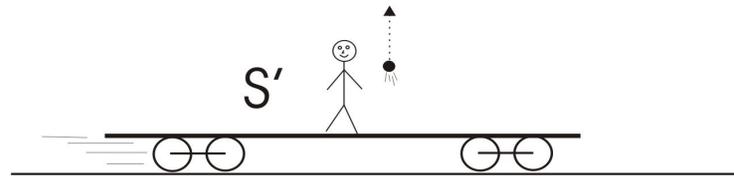


Figura 3

Um observador que se encontra em movimento sobre uma plataforma verá uma trajetória vertical para o projétil.

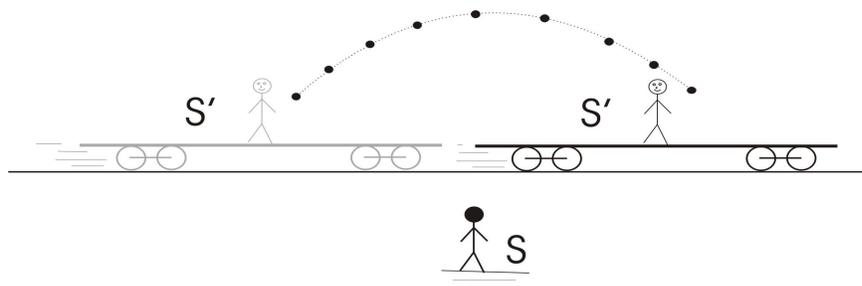


Figura 4

Um observador que se encontra em um referencial no solo verá uma trajetória parabólica para o projétil.

Podemos citar o filósofo John Locke que escreveu há duzentos anos, em seu grande tratado “Sobre o entendimento humano”, da importância do referencial: “Se encontrarmos as pedras do xadrez na mesma posição em que as deixamos, diremos que elas não foram movidas, ou permanecem imóveis, mesmo que o tabuleiro, nesse ínterim, tenha sido transportado para outro cômodo. Da mesma forma diremos que o tabuleiro não se moveu, se ele permanece no mesmo lugar em que se encontrava na cabina, embora o navio esteja andando. E diremos também que o navio se encontra no mesmo lugar, desde que se mantenha à mesma distância da terra, embora o globo tenha dado uma volta completa. Na verdade, as pedras de xadrez, o tabuleiro e o navio, tudo isso mudou de lugar em relação a corpos situados muito mais longe”.

Então, para descrevermos o movimento dos corpos quantitativamente é necessário adotarmos um referencial, como por exemplo, as paredes da sala de aula, onde podemos considerar que existam três eixos imaginários que se cruzam ortogonalmente. Além do referencial, o observador necessita de um relógio para poder descrever quantitativamente o movimento. A Relatividade galileiana, termo utilizado por Einstein, trata da descrição de movimentos em relação a um referencial inercial, ou seja, um referencial em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme (não acelerado) em relação a outro referencial.

2.1.1. *Transformações galileanas*

Consideremos dois referenciais inerciais: um deles S, formado pelos eixos x, y e z, em repouso em relação à Terra e outro, S', formado pelos eixos x', y' e z', paralelos a x, y e z, respectivamente, e com velocidade \vec{V} na direção do eixo x em relação ao sistema S, conforme a figura 4.

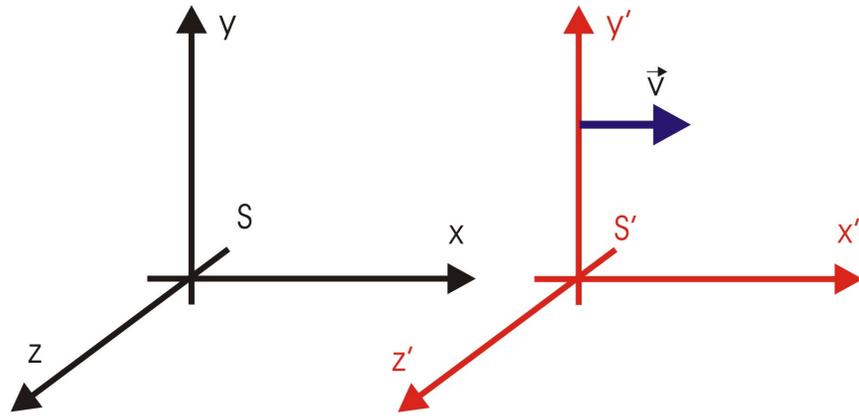


Figura 5

Consideremos que ocorra um evento em um ponto P que pode ser identificado pelo conjunto de quatro coordenadas em cada referencial: em S (x, y, z e t) e S' (x', y', z' e t'), sendo que as três primeiras coordenadas de cada referencial localizam o ponto no espaço, enquanto a quarta coordenada indica o momento da ocorrência do evento. Se considerarmos que inicialmente os referenciais S e S' coincidem em $t = t' = 0$, temos que $x_0 = x'_0$, $y_0 = y'_0$ e $z_0 = z'_0$, conforme a figura 5.

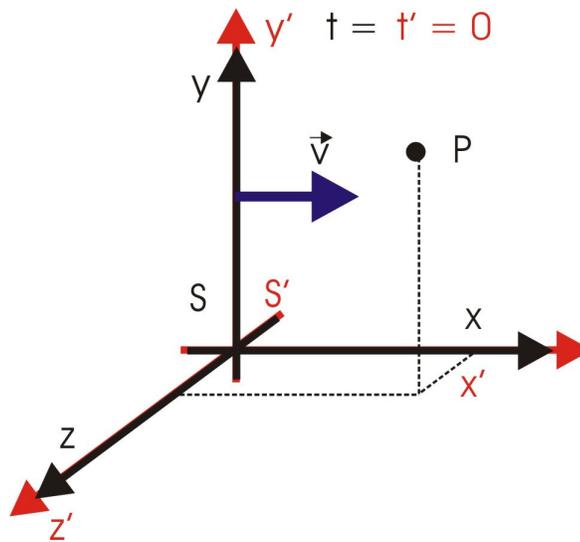


Figura 6

Agora consideremos um instante posterior $t = t' > 0$. O referencial S' terá se deslocado de uma distância $V.t$, em relação ao referencial S, de acordo com a figura 6.

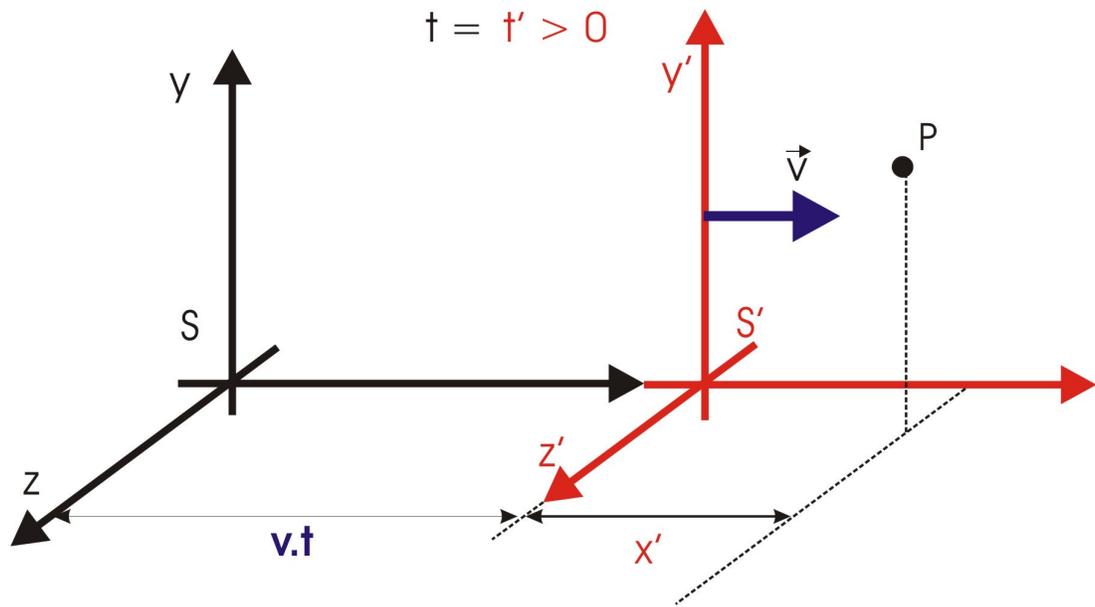


Figura 7

Então, podemos relacionar as coordenadas dos dois referenciais da seguinte forma:

$$x = x' + V.t; \quad (1)$$

$$y = y'; \quad (2)$$

$$z = z'; \quad (3)$$

$$t = t'. \quad (4)$$

Note que estamos fazendo $t = t'$ (relógios estão sincronizados). Isto, porque para Galileu o tempo é absoluto, independente do referencial, o que chamamos de invariância do tempo. Isto está de acordo com o nosso senso comum, pois se não fosse assim, teríamos que sincronizar os nossos relógios constantemente.

Uma conseqüência direta da invariância do tempo, segundo as transformações galileanas, é a invariância do comprimento. Explicitando melhor, pelas transformações de Galileu, concluímos que o comprimento, assim como o tempo, é absoluto, independentemente do referencial em que for medido.

Ainda com relação ao referencial, Galileu afirmou ser impossível determinar se um navio estava parado ou em movimento uniforme, realizando uma experiência mecânica em um dos seus camarotes. Com esta afirmação, podemos concluir que as leis da Mecânica são invariantes (não mudam) perante uma transformação de Galileu.

Pense e Responda:

1) Considere dois referenciais inerciais, S e S', que coincidam em $t = 0$, o referencial S' encontrando-se em movimento em relação a S com velocidade constante de 90 km/h, no sentido positivo do eixo x de S. Determine a posição da origem de S' em relação à origem de S após 5 minutos.

2) Quais as principais características da Relatividade galileana?

3) Qual a diferença entre um referencial inercial e um referencial não inercial?

4) Como você determinaria se um referencial é inercial ou não?

2.2. Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos

Isaac Newton nasceu na Inglaterra na noite de Natal do ano de 1642, na cidade de Lincolnshire. Newton veio ao mundo em uma época em que a Ciência, o conhecimento humano, passava por grandes modificações. O pensamento aristotélico passa a ser criticado, surgindo uma nova Ciência, com a utilização da Matemática para a descrição dos fenômenos da Natureza. Newton desenvolveu sua obra utilizando conhecimentos deixados por outros grandes pensadores como Galileu, Kepler, Descartes. O próprio Newton afirmou que “se enxergou mais longe era porque estava sobre ombros de gigantes”.

Em 1687, Newton publicou a sua maior obra, *Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural (Principia Mathematica Philosophiae Naturalis)*, contendo uma exposição da Cinemática de Galileu e do movimento dos planetas descrito por Kepler.

Podemos considerar que a essência dos *Principia* está no que hoje denominamos as três Leis de Newton: a primeira é a Lei da Inércia, segundo a qual um corpo deixado por si permanece em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme; a segunda é a que relaciona a força resultante sobre uma partícula com sua aceleração, e é também conhecida como princípio fundamental da Dinâmica; a terceira é o conhecido princípio de ação-reação.

A primeira Lei de Newton, Lei da Inércia, é considerada por muitos autores, de uma forma equivocada, apenas como um caso especial, particular, da segunda Lei. Mas, para a formulação da primeira Lei, Newton levou mais de vinte anos, passando por um

lento e gradual amadurecimento, até chegar à sua forma final. Esta lei estabelece o sistema de referência inercial. Para se medir a força e seus efeitos na mudança do movimento, necessitamos de um referencial inercial. Então, a primeira Lei é fundamental para a existência da segunda, ou seja, uma lei complementa a outra.

O que podemos concluir a respeito das Leis de Newton é que a massa e a aceleração de um corpo independem do sistema referencial inercial escolhido. Com isso, a força resultante, descrita pela segunda Lei de Newton, é independente do referencial em que for medida, nenhum sistema referencial inercial sendo preferencial a qualquer outro. Sendo assim, as Leis de Newton são iguais em qualquer sistema referencial inercial.

Partindo disso, podemos relacionar as velocidades e as acelerações de um ponto P em relação a dois referenciais inerciais, S e S', utilizando as transformações galileanas da seguinte forma:

$$v'_x = v_x - V; \quad (5)$$

$$v'_y = v_y; \quad (6)$$

$$v'_z = v_z. \quad (7)$$

$$a'_x = a_x; \quad (8)$$

$$a'_y = a_y; \quad (9)$$

$$a'_z = a_z. \quad (10)$$

Na equação (5), V expressa a intensidade da velocidade de S' em relação a S, orientada no sentido positivo do eixo x de S, como indica a figura 4.

Imaginemos um exemplo de uma pessoa A em um avião em movimento com velocidade constante, e uma outra pessoa B em uma plataforma fixa e em repouso em relação à Terra. Se ambos lançarem um objeto verticalmente para cima com velocidades iniciais iguais, irão medir a mesma altura máxima atingida pelos objetos, o mesmo tempo para atingi-la, concordando quanto à forma da trajetória descrita pelo objeto. Também concordam com a aceleração e a força resultante que será exercida sobre o objeto. Portanto, podemos concluir que os dois referenciais são equivalentes para a descrição deste movimento, ou seja, tanto a plataforma quanto o avião em velocidade constante são referenciais equivalentes, sendo impossível distinguirmos um do outro.

2.3. O Eletromagnetismo

A Eletricidade e o Magnetismo foram desenvolvidos de forma totalmente independente até o século XIX, quando Oersted verificou uma relação entre os efeitos elétricos e magnéticos. Assim como a Mecânica clássica, o Eletromagnetismo foi uma teoria unificadora, já que Maxwell, em 1873, unificou não apenas a Eletricidade ao Magnetismo, mas também à Óptica. Quando a Teoria Eletromagnética foi desenvolvida, existia um predomínio da Mecânica newtoniana, e acreditava-se que esta poderia descrever todos os fenômenos da Natureza.

A seguir faremos uma breve descrição dos principais fatos da evolução da Eletricidade e do Magnetismo, até a sua unificação.

2.3.1. A Eletricidade

O estudo da Eletricidade teve seu início com os gregos. Eles observavam que alguns elementos possuíam propriedades de atração e de repulsão, mas não diferenciavam ainda os fenômenos elétricos dos magnéticos. Somente no século XVI, através dos trabalhos do matemático italiano G. Cardano, foi que se estabeleceu claramente a diferença entre as propriedades magnéticas e elétricas.

Em 1600, William Gilbert, médico britânico, publicou o livro *De Magnete* que, além de também fazer a distinção entre os efeitos elétricos e magnéticos, diferenciou os elementos que se comportavam como o âmbar⁵, denominando-os de elétricos e os que não se portavam como o âmbar, os não elétricos. Também foi o precursor da idéia de campo elétrico, ao descrever como ocorria a atração ou repulsão dos corpos à distância.

Em 1667, na *Accademia Del Cimento*, pesquisadores buscaram realizar experimentos para verificar se o âmbar e outros elementos necessitavam do ar como meio para exercerem suas forças de atração. Não chegaram a fazê-lo, devido à dificuldade para se obter o vácuo. No entanto, concluíram que a atração entre os corpos eletrizados era mútua, ao contrário do que Gilbert pensava. Robert Boyle (1675) conseguiu aperfeiçoar

⁵ Efeito âmbar – efeito de atração ou de repulsão registrado na Antigüidade clássica, por alguns materiais.

uma bomba de vácuo e realizar uma experiência, verificando que não havia a necessidade do ar para que ocorresse a interação elétrica entre os corpos.

O primeiro gerador eletrostático foi desenvolvido por Guericke, por volta de 1663, no qual a eletrização era obtida quando a rotação de uma esfera era parada com a mão. Posteriormente, foi desenvolvido o gerador por indução, dentre os quais podemos destacar o de James Wimshurst (1882).

Os conceitos de condução e indução elétrica foram introduzidos em 1729 pelo inglês Stephen Gray que publicou, em um artigo na revista *Philosophical Transactions* da *Royal Society* (comunidade científica da qual Newton foi membro), seus resultados sobre a indução e a condução elétrica. Neste mesmo artigo, ele relata a distinção entre os materiais que hoje denominamos de condutores e isolantes.

O cientista francês Charles du Fay (Dufay), em 1734, descobriu a existência de duas espécies de eletricidade que hoje denominamos de positiva e negativa. Na época, foram denominadas de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa. Algum tempo depois, Dufay verificou que um mesmo material poderia possuir uma ou outra eletricidade, a depender da forma como era atritado.

Com as contribuições de Dufay, começaram-se a elaborar teorias de fluidos para a eletricidade, nas quais podemos destacar a de Benjamin Franklin ao postular a existência de um fluido único que um corpo poderia ter em excesso ou em falta. Ou a idéia de Robert Symmer, em 1759, em que a matéria teria dois tipos de fluidos e que em seu estado natural (corpo neutro) possui quantidades iguais desses dois fluidos.

Em 1785, Charles Coulomb, usando uma balança de torção, enunciou a lei básica da Eletrostática, segundo a qual as forças de atração ou repulsão variam proporcionalmente ao inverso do quadrado da distância.

Os estudos relacionados aos fenômenos elétricos começaram a ter um grande avanço a partir do século XVIII, pois, além de se verificar a existência de duas cargas distintas, também começaram os estudos relacionados com as cargas em movimento, o que hoje conhecemos como corrente elétrica. Como veremos mais adiante, o desenvolvimento do conhecimento da corrente elétrica foi fundamental para a unificação da Eletricidade com o Magnetismo. A seguir, faremos uma breve descrição da evolução do conhecimento do Magnetismo.

2.3.2. O Magnetismo

Assim como a Eletricidade, o Magnetismo também teve suas primeiras observações na Grécia, mas, conforme já mencionado, não se sabia quais eram as diferenças entre os efeitos elétricos e magnéticos. Contudo, foram os chineses os primeiros a fazerem uso das propriedades magnéticas que alguns materiais possuíam, utilizando a bússola. Mas, os primeiros registros da utilização da bússola no ocidente foram realizados somente em 1180, no livro do inglês Alexander Neckan.

O engenheiro militar francês Pierre de Maricourt, em seu trabalho de 1269, foi o primeiro a evidenciar uma das questões fundamentais do Magnetismo, que é a questão dos monopólos magnéticos: não temos como isolar apenas um pólo magnético (sul ou norte), como no caso da Eletricidade, em que podemos ter carga positiva ou negativa.

Como já citado, em 1600, William Gilbert, em seu livro, *De Magnete*, descreve a relação entre atração mútua entre os ímãs e o ferro. Gilbert adotava a idéia de esfera de influência para descrever a atração nas proximidades do ímã, o que hoje conhecemos como campo magnético. Também nesse trabalho, conforme já mencionado, ele descreve as diferenças entre o Magnetismo e a Eletricidade. Uma de suas maiores contribuições foi a observação de que a Terra se comporta como um grande ímã.

Após as contribuições de Gilbert, por mais de 200 anos muito pouco se avançou no estudo do Magnetismo, diferentemente dos estudos envolvidos com a Eletricidade. Os estudos sobre os efeitos do Magnetismo somente foram retomados fortemente a partir das observações de Oersted, conforme veremos a seguir.

2.3.3. Eletromagnetismo – a unificação

Anteriormente aos estudos realizados por Oersted, já se dispunha de algumas evidências da existência de uma relação entre o Magnetismo e a Eletricidade. Sabia-se que as bússolas eram perturbadas durante as tempestades quando, por ação dos raios, sua polarização podia ser invertida. Com a descoberta de Franklin de que a natureza dos raios de uma tempestade é de origem elétrica, começou-se o estudo da relação entre a Eletricidade e o Magnetismo.

Em 1819, Oersted apresentou uma conferência sobre os efeitos elétricos e magnéticos a um público que já possuía conhecimento a respeito dos fenômenos. Entre as apresentações realizadas, uma é vista como um marco no surgimento do Eletromagnetismo. A experiência realizada por Oersted consistia em colocar uma bússola com seu ponteiro perpendicular a um fio por onde passava uma corrente elétrica. Com esta configuração nada poderia ser observado de anormal. Ao colocar o ponteiro paralelamente ao fio, Oersted percebeu que, com a passagem de uma corrente, o ponteiro era desviado em noventa graus. Se o sentido da corrente fosse invertido, o ponteiro girava em sentido oposto. A partir destas evidências, começou-se a busca pela relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Muitos autores mencionam que esta passagem que acabamos de descrever foi descoberta por Oersted por acaso. Comentam que o cientista deixou por esquecimento uma bússola embaixo de um fio condutor e, ao passar a corrente, observou que o objeto era perturbado. Porém, não podemos considerar uma mera casualidade a sua descoberta, pois, conforme relatamos, já havia indícios da existência da relação e o próprio Oersted estava envolvido com seu estudo.

Logo após a divulgação de Oersted dos resultados obtidos através de seus experimentos, várias foram as descobertas que se sucederam. Dentre elas, podemos destacar as investigações feitas pelo francês Ampère. A partir de setembro de 1820, durante os três meses que se seguiram, Ampère publicou quinze artigos referentes a fenômenos eletromagnéticos, dentre os quais podemos destacar um instrumento para medir corrente elétrica a partir dos efeitos Eletromagnéticos e outro onde dois fios paralelos percorridos por correntes de sentidos opostos se repeliam. O estudioso também percebeu que, ao passar a corrente elétrica por espiras, estas interagem como se fossem ímãs.

Os franceses Jean Biot e Félix Savart, em 30 de outubro de 1820, anunciavam os resultados das medições de forças exercidas sobre uma agulha imantada próxima a um fio condutor, percorrido por uma corrente. Esta publicação acabou por culminar no que hoje chamamos de Lei de Biot-Savart, que dá a expressão geral do campo magnético gerado ao redor de um fio condutor percorrido por uma corrente.

Em 1831, uma outra importante descoberta foi apresentada por Michael Faraday, que é a indução magnética: assim como a corrente elétrica produz campo magnético, um campo magnético variável também produz corrente elétrica em um condutor. Uma das consequências desta descoberta foi a possibilidade da construção de máquinas elétricas

geradoras de corrente elétrica. Nos dias de hoje, a energia elétrica utilizada em nossas casas é gerada a partir deste princípio.

Para completar as descobertas básicas acerca do Eletromagnetismo, um físico russo, Heinrich F. E. Lenz mostrou que os efeitos das correntes elétricas induzidas por forças eletromagnéticas sempre se opõem a essas forças. Com outras palavras, a corrente elétrica induzida gera um campo magnético de sentido contrário à variação do que a gerou.

2.3.4. O Eletromagnetismo e Maxwell

O físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, no ano de 1873, foi quem sintetizou as equações do Eletromagnetismo. Em seu tratado sobre Eletricidade e Magnetismo, descreveu uma formulação matemática na qual conseguiu unificar as leis de Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Faraday e Lenz, atualmente conhecidas como Equações de Maxwell. Campos elétricos e magnéticos satisfazem uma equação análoga às de ondas elásticas, a onda eletromagnética tendo a mesma velocidade da luz. Concluiu-se, portanto, que a natureza da luz é eletromagnética.

Citando agora Maxwell, a respeito de sua descoberta:

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

A confirmação da hipótese de Maxwell de a luz ser de origem eletromagnética foi feita em 1887 pelo físico alemão H. Hertz. Esta confirmação se deu por meio de um circuito oscilante que produziu ondas que podiam ser refletidas, refratadas, difratadas e polarizadas da mesma forma que a luz.

Maxwell conseguiu unir três ramos do conhecimento científico da época em uma única teoria: Eletricidade, Magnetismo e Óptica. Como consequência disso, no final do século XIX, acreditava-se que pouco ou nada restava para ser adicionado ao conhecimento

do Eletromagnetismo e da Mecânica newtoniana. Porém, ainda restavam alguns problemas. Dentre eles podemos destacar o fato de que se a luz é uma onda, necessita de um meio para se propagar, pois, segundo o conhecimento da época, todas as ondas (mecânicas) necessitavam de um meio para sua propagação.

Pense e Responda:

5) Faça um comentário sobre a seguinte afirmação:

“Todo o desenvolvimento científico sempre é feito a partir de uma observação, para somente em seguida se fazer uma descrição do fenômeno.”

6) O conhecimento do Homem sempre evolui de forma contínua, ou seja, sempre se utilizou teoria já desenvolvida para elaborar uma nova teoria. Cite exemplos que ilustrem esta afirmação.

7) Qual foi a importância das Equações de Maxwell?

8) Cite um conflito surgido com o estabelecimento da natureza ondulatória da luz.

2.3.5. Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica clássica

As Equações de Maxwell descreviam uma onda eletromagnética, cuja propagação se dava no vácuo, o que causava um sério problema, pois se a luz era uma onda, isto não poderia ocorrer. O conhecimento que se tinha neste período era de ondas mecânicas, como por exemplo, ondas sonoras que necessitam de um meio para se propagar. Essa visão mecanicista dominava o pensamento científico da época. Então, imaginou-se que deveria existir um meio com algumas propriedades especiais onde as ondas eletromagnéticas se propagassem. Para este meio, chamado de éter luminífero ou simplesmente éter, era necessário postular propriedades um tanto incomuns, como densidade zero e transparência perfeita. Este meio já havia sido idealizado por René Descartes no século XVI.

Várias foram as tentativas de provar a existência do éter, que deveria permear todo o universo. Uma das tentativas mais famosas foi a realizada pelos físicos A. A. Michelson em 1881, e em 1887 por Michelson e E. W. Morley, utilizando um instrumento que denominamos de interferômetro.

Com o interferômetro seria possível determinar o movimento da Terra em relação ao éter. Mas, depois de realizadas as experiências, Michelson e Morley não conseguiram verificar a existência desse meio de propagação.

Para salvar todo o conhecimento teórico que se possuía até o momento, FitzGerald (em 1892) propôs uma hipótese que foi aceita e complementada por Lorentz. Esta hipótese consistia em supor que os corpos são contraídos, quando se deslocam, no sentido do movimento relativo ao éter estacionário, por um fator de $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ (v é a velocidade do sistema, e c é a velocidade da luz).

Mas, além deste problema, existia um outro. Como já mencionado na Relatividade galileana, as leis da Física deveriam ser iguais em qualquer referencial inercial. Isto quer dizer que deveríamos observar as mesmas manifestações de um fenômeno, indiferentemente do referencial inercial em que nos encontramos.

Mas foram constatadas inconsistências com este princípio. Ao passarmos de um referencial inercial para outro, utilizando as transformações galileanas, para um mesmo fenômeno, as Equações de Maxwell forneciam resultados diferentes, gerando assim um conflito. Ou as equações de Maxwell estavam erradas ou teríamos que mudar as transformações galileanas.

Frente a isto, tinha-se três alternativas:

1. A Relatividade galileana seria válida apenas para a Mecânica clássica. As leis do Eletromagnetismo exigiriam um referencial inercial preferencial chamado éter.

2. A Relatividade galileana seria válida tanto para a Mecânica clássica quanto para o Eletromagnetismo, mas as equações de Maxwell deveriam ser modificadas.

3. As equações de Maxwell seriam válidas, mas as leis da Mecânica clássica teriam que ser modificadas.

As equações de Maxwell eram bastante fundamentadas para que fossem modificadas. As leis da Mecânica clássica também possuíam uma boa fundamentação teórica e experimental. Então, como alternativa, Einstein escolheu modificar as transformações de Galileu (alternativa 3).

2.4. Einstein e a origem da Relatividade Especial

Em 1905, Albert Einstein, físico alemão, publicou cinco grandes artigos, dentre os quais um deu origem à Teoria da Relatividade Especial, sob o título *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*.

A condição da validade das Equações de Maxwell em qualquer referencial inercial levava à invariância da velocidade da luz, o que contradizia a Relatividade galileana. Einstein considerou que a velocidade da luz é a mesma para qualquer referencial inercial, o que causou sérias modificações nas concepções de tempo e espaço aceitas até a época.

Einstein enunciou dois postulados:

- 1) **As leis da Física são iguais em qualquer referencial inercial, ou seja, não existe referencial inercial preferencial.**
- 2) **A luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, cujo módulo é independente do estado de movimento do corpo emissor.**

O primeiro postulado está associado diretamente às leis da Mecânica, Termodinâmica, Óptica e do Eletromagnetismo, ou seja, é uma generalização do princípio da Relatividade galileana e de Newton, que se aplicava apenas à Mecânica. Esta generalização de várias leis somente foi possível graças à modificação dos conceitos de espaço e tempo.

O segundo postulado trouxe, entre algumas conseqüências, a de que nenhuma partícula pode se deslocar com velocidade superior à da luz.

Nos próximos capítulos, iremos discutir as conseqüências a que estes dois postulados levaram, que em muito contrariam o nosso senso comum. Discutiremos os seguintes aspectos: relatividade da simultaneidade, dilatação temporal, contração do espaço, adição de velocidades na Relatividade Especial, relação massa-energia, paradoxo dos gêmeos e uma introdução à Relatividade Geral.

Pense e Responda:

- 9) Comente os conflitos existentes na Física no final do século XIX.

- 10) A Teoria da Relatividade Especial conseguiu unificar quais ramos da Física?
- 11) Cite os postulados de Einstein, comentando as suas conseqüências.
- 12) Determine a velocidade de uma partícula que leva dois anos mais que a luz para percorrer a distância de 7 anos-luz. Um ano-luz é a distância percorrida pela luz em um ano.

3. RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

Na Relatividade galileana, dois eventos são simultâneos para qualquer observador desde que, em qualquer referencial inercial, ocorra a simultaneidade. Isto porque, para a Relatividade galileana, o tempo é absoluto, independe do referencial que estivermos utilizando.

Para a Relatividade Especial de Einstein, o conceito de tempo deixou de ser absoluto e passou a ser relativo. Eventos simultâneos, em um determinado referencial inercial, não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial. Assim, a noção de simultaneidade também é relativa.

Vejamos um exemplo simples. Consideremos o trem de Einstein (experiência de pensamento) que se desloca com velocidade relativística constante \vec{V} (velocidade próxima à da luz), com um observador S' que se encontra exatamente no meio do trem, e outro observador S que se encontra no solo, e que estão se cruzando exatamente quando os raios ocorrem (ver figura 7). Consideremos que dois raios atinjam as posições frontal e traseira do trem, do ponto de vista do observador S , ao mesmo tempo. Os eventos serão simultâneos para o observador S , pois as duas frentes de onda de luz irão atingi-lo ao mesmo tempo. Já para o observador que está no referencial no interior do trem (referencial S') os eventos não serão simultâneos, ou seja, ele verá primeiro a frente de onda da frente, pois é neste sentido que se desloca o trem, e depois verá a frente de onda de trás. Isto está de acordo com o princípio da invariância da velocidade da luz, ou seja, para qualquer que seja o observador inercial, ambos os pulsos se movem com a mesma rapidez c . Logo, S' é levado a concluir que o raio produzido na frente do trem foi emitido primeiro do que o outro, ou seja, para este observador os raios não são simultâneos.

Mas quem está com a razão, o observador S ou o observador S' ? Ambos estão corretos; embora pareça estranho, não existe uma única resposta para esta questão. A simultaneidade é uma noção relativa e não absoluta.

Analise a figura a seguir.

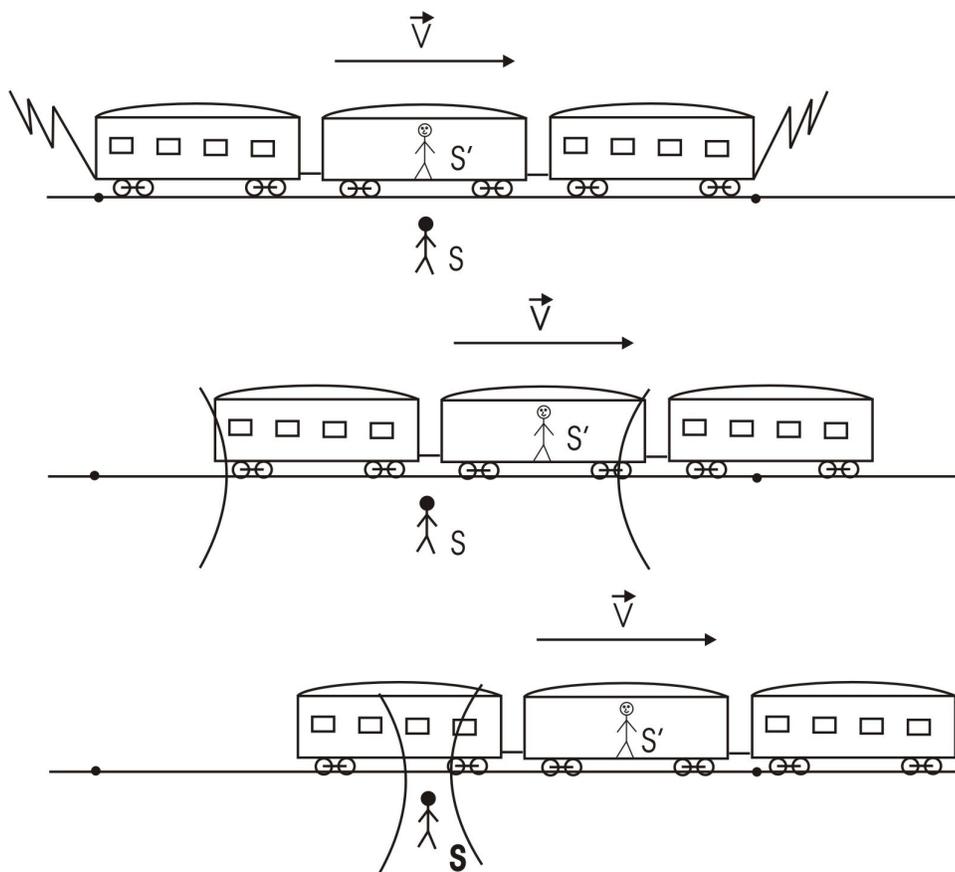


Figura 8

Se a velocidade da luz fosse infinita em qualquer referencial, os dois eventos seriam simultâneos para os dois observadores. Mas, como a rapidez da luz é igual em todas as direções em qualquer referencial inercial, os dois eventos que são simultâneos em um referencial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial.

Pense e Responda:

13) Nosso senso comum é de que se dois acontecimentos são simultâneos em um referencial inercial, em qualquer outro referencial inercial estes mesmos acontecimentos também serão simultâneos. Mas isto está em desacordo com a Relatividade Especial. Por que acontecimentos simultâneos em um referencial inercial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial? Isto é consequência de qual postulado?

14) Se um evento A ocorre antes de um evento B em um referencial inercial, é possível que em outro referencial inercial o evento B ocorra antes do evento A?

4. DILATAÇÃO TEMPORAL

Uma das conseqüências da luz se propagar em todas as direções com a mesma rapidez é que as medidas de tempo não são mais absolutas, como consideravam Galileu e Newton, ou seja, as medidas de tempo irão depender do referencial inercial em que o tempo é medido.

Consideremos a seguinte situação: um trem desloca-se com velocidade constante \vec{V} , em relação ao solo, o qual poderemos considerar como um referencial inercial que chamaremos de S. Dentro do trem, que será o nosso referencial inercial S', um sinal de luz é emitido verticalmente e refletido por um espelho que se encontra no teto. Sejam D a distância do teto até a fonte emissora de luz, e $\Delta t'$ intervalo de tempo necessário para que a luz se desloque até o espelho e retorne, do ponto de vista de S'. Assim $\Delta t' = 2.D/c$. Veja a figura 8, que indica esquematicamente a experiência realizada em S'.

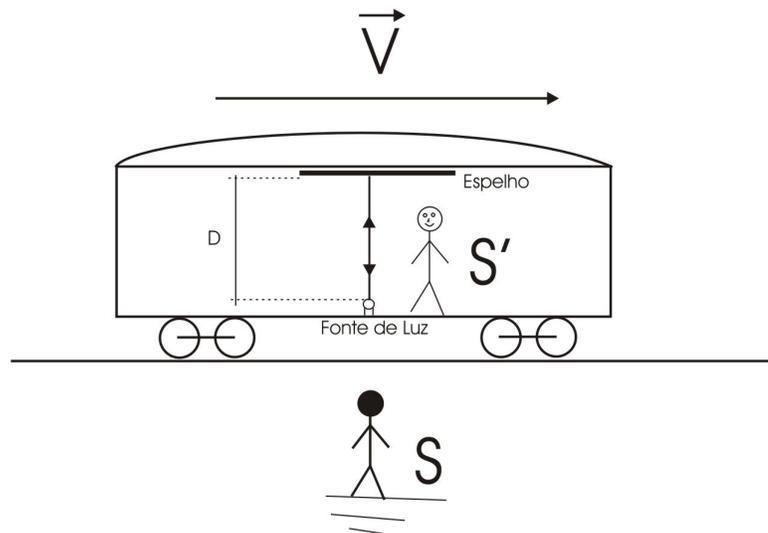


Figura 9

Agora, se considerarmos um observador que se encontra no solo, onde o trem se desloca com velocidade \vec{V} constante, ele irá medir um intervalo de tempo maior para o mesmo processo. Como a luz percorre uma distância AB com a mesma rapidez, teremos que o intervalo de tempo para a luz atingir o espelho, medido por este observador, será igual a AB/c . Logo a experiência (ida e volta do sinal de luz) terá durado o intervalo de

tempo $\Delta t = 2.AB/c$. Como a distância AB é maior que a distância D e sendo a rapidez da luz constante, teremos como consequência que $\Delta t > \Delta t'$. Analise a figura 9.

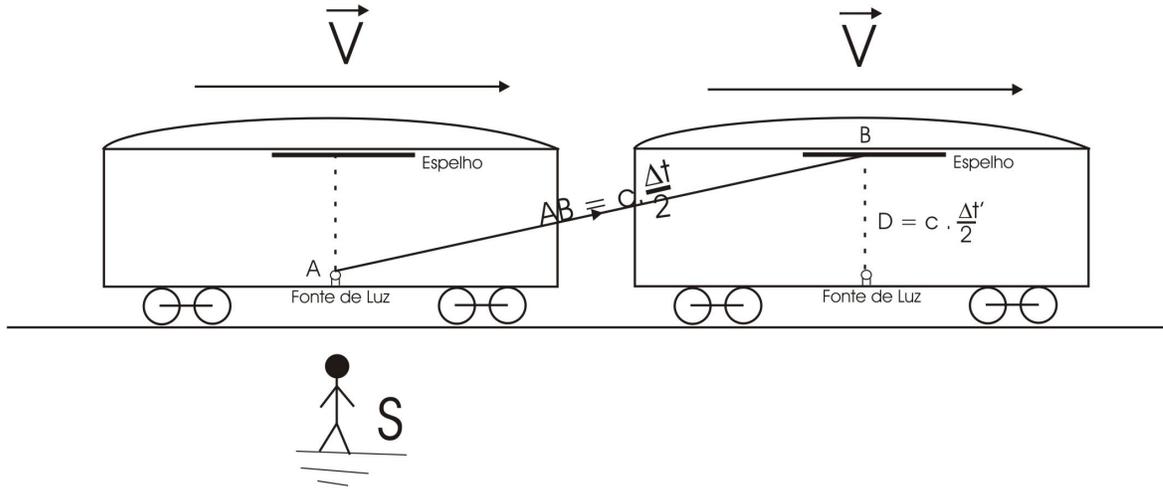


Figura 10

Enquanto o sinal de luz sobe da fonte até o espelho, o trem desloca-se, no solo, de uma distância d, que pode ser determinada por $d = V \cdot \Delta t/2$. Podemos determinar a relação entre $\Delta t'$ e Δt pelo teorema de Pitágoras, considerando o triângulo retângulo da figura 10.

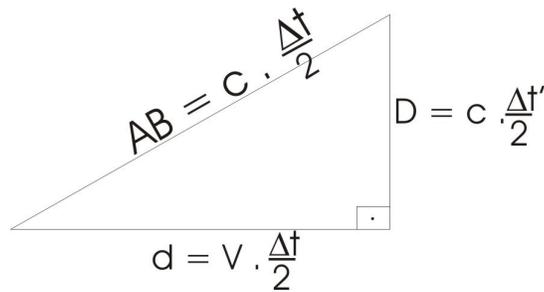


Figura 11

Temos, portanto:

$$(AB)^2 = d^2 + D^2$$

$$c^2 \cdot \Delta t^2 = V^2 \cdot \Delta t^2 + c^2 \cdot \Delta t'^2$$

$$(c^2 - V^2) \cdot \Delta t^2 = c^2 \cdot \Delta t'^2$$

Dividindo tudo por c^2 , temos:

$$\Delta t^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right) = \Delta t'^2$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c} \right)^2}} . \quad (11)$$

Usualmente utilizamos $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$, onde γ é denominado de fator de Lorentz:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c} \right)^2}} . \quad (12)$$

Veja que só $V < c$ permite, para γ , um valor real.

Como o fator γ é sempre maior que um, teremos, como já referido anteriormente, que $\Delta t > \Delta t'$. Assim, quem está fora do trem irá medir um intervalo de tempo maior do que o observador que estiver dentro do trem. Este fenômeno é conhecido como dilatação temporal.

O intervalo de tempo para quem mede no interior do trem é chamado de tempo próprio ($\Delta t'$), e o intervalo de tempo para quem está no referencial fora do trem é chamado de tempo dilatado (Δt).

O movimento, portanto, afeta o tempo.

O tempo próprio é o do referencial em que se está medindo a duração entre dois eventos ocorridos no mesmo local (em nosso exemplo, emissão e absorção do sinal de luz, pela fonte fixa ao trem).

Não percebemos a dilatação do tempo em nosso cotidiano porque as velocidades que atingimos são muito menores que a velocidade da luz, o fator de Lorentz sendo praticamente igual a um.

Exemplo 1:

Consideremos que uma pessoa esteja viajando em uma nave com velocidade constante de 60% da velocidade da luz, em relação à Terra, e verifica que um determinado processo dentro da nave leva, para sua ocorrência, um intervalo de tempo de 1 minuto. Para um observador que ficou em um referencial inercial em repouso em relação à Terra, qual será o intervalo de tempo para a ocorrência do mesmo processo?

Resolução:

As informações do problema são:

$$V = 0,6.c;$$

$$\Delta t' = 1 \text{ min} = 60 \text{ s (tempo próprio, medido pelo próprio viajante);}$$

$\Delta t = ?$ (Determinar o tempo medido por um observador que permaneceu em um referencial em repouso em relação à Terra.)

O fator de Lorentz vale:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6.c}{c}\right)^2}} \Rightarrow \gamma = 1,25 .$$

Logo,

$$\Delta t = \gamma . \Delta t' = 1,25 . \Delta t' :$$

$$\Delta t = 75 \text{ s} .$$

O observador que ficou na Terra medirá um intervalo de tempo de 75 segundos, ou seja, o processo terá uma duração de 15 segundos a mais do que o intervalo de tempo medido pelo observador que ficou dentro da nave.

Exemplo 2:

O efeito do movimento sobre o tempo já foi bastante usado em filmes de ficção científica, como em *O Planeta dos Macacos*, em que a tripulação de uma nave espacial fica em missão durante três anos, medido no relógio da nave. Quando ela regressa à Terra, verifica que aqui se passaram cinquenta anos!⁶

Calcule para essa situação:

- a) o fator de Lorentz;
- b) a rapidez da nave.

Resolução:

⁶ Este exemplo foi retirado de FERRARO, Nicolau Gilberto. *Física – Ciência e Tecnologia*. Volume Único; Ed. Moderna. p. 597.

a) Neste caso, temos que o intervalo de tempo próprio ($\Delta t'$) é igual a três anos, e o intervalo de tempo dilatado (Δt) é igual 50 anos. Então, podemos determinar o fator de Lorentz:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \Rightarrow \gamma = \frac{\Delta t}{\Delta t'} \Rightarrow \gamma = \frac{50}{3} \Rightarrow \gamma \cong 16,7 .$$

b) Como já determinamos o valor do fator de Lorentz, utilizamos este para determinar com que rapidez a nave deve viajar para que ocorra a dilatação temporal.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \Rightarrow \gamma^2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2} \Rightarrow 1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2 = \frac{1}{\gamma^2} \Rightarrow \left(\frac{V}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{16,7^2}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right)^2 = 0,9964$$

$$\left(\frac{V}{c}\right) = \sqrt{0,9964}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right) = 0,998$$

$$V = 0,998 \cdot c .$$

A rapidez que a nave teve durante os três anos foi de 99,8% da rapidez da luz, muito acima dos valores que estamos acostumados a ver. Apesar do filme ser de ficção, a base está fisicamente correta.

Pense e Responda:

15) José encontra-se em um referencial inercial S' em movimento em relação a outro referencial inercial S , onde está Carlos. José realiza uma experiência, em S' , e mede sua duração $\Delta t_{\text{José}}$ (tempo próprio). Carlos, de S , vê a experiência durar Δt_{Carlos} (tempo dilatado). Foi constatado que $\Delta t_{\text{Carlos}} = 2\Delta t_{\text{José}}$. Com este resultado é possível estimar que a rapidez relativa entre os referenciais é aproximadamente:

16) Uma espaçonave viaja com rapidez $V = 0,80.c$. Supondo que se possa desprezar os tempos de aceleração e desaceleração da nave durante uma jornada de ida e volta que leva 12 anos, medidos por um astronauta a bordo, pode-se afirmar que um observador que permaneceu na Terra terá envelhecido, em anos:

17) Desejamos fazer uma viagem, de ida e volta, viajando em uma espaçonave com velocidade constante em linha reta, durante seis meses e, então, retornar com a mesma rapidez. Desejamos, além disso, ao retornar, encontrar a Terra como ela será 1000 anos depois, contados do início da viagem. Determine:

a) Com que rapidez devemos viajar?

b) Importa, ou não, que a viagem se faça em linha reta ou em círculo?

5. CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Uma outra consequência dos postulados da Relatividade Restrita é a relatividade do comprimento. Assim como o tempo, o comprimento terá valores diferentes para observadores que se encontram em movimento relativo um em relação ao outro. A contração do comprimento sempre ocorre na mesma direção do movimento.

Vamos considerar novamente, como exemplo, um trem que se desloca com velocidade constante em relação à plataforma da estação, e dois observadores: um no interior do trem (S') e outro na plataforma (S). Suponhamos que um observador em S meça o comprimento da plataforma, encontrando o valor L . Este é o chamado comprimento próprio da plataforma, aquele que foi medido no referencial em que ela está em repouso. Este observador vê a frente do trem passar pela plataforma no intervalo de tempo Δt .

Note que o trem viaja na direção do comprimento medido. São medidas na direção do movimento do referencial móvel que sofrem efeitos relativísticos. O observador em S pode, então, concluir que $L = V \cdot \Delta t$. Para um observador em S' , a plataforma é que se move. Para ele, o comprimento medido vale $L' = V \cdot \Delta t'$, onde $\Delta t'$ é o tempo próprio, a duração entre dois eventos ocorridos no mesmo local, em seu referencial: a passagem de um extremo da plataforma pela frente do trem, e a passagem do outro extremo da plataforma pela mesma frente do trem.

Então,

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad \text{e}$$
$$V = \frac{L'}{\Delta t'}$$

Logo,

$$\frac{L}{L'} = \frac{\Delta t}{\Delta t'} \quad (13)$$

Mas, das equações (11) e (12),

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (14)$$

As equações (13) e (14), portanto, levam a:

$$L = \gamma \cdot L' ,$$

ou seja,

$$L' = \frac{L}{\gamma} . \quad (15)$$

Aqui, o comprimento próprio é L . Como $\gamma > 1$, $L' < L$, ou seja, o comprimento da plataforma, conforme medido em um referencial em relação ao qual ela está em movimento, é sempre menor que seu comprimento próprio.

Exemplo 3:

Uma nave desloca-se com velocidade de 85% da velocidade da luz ($0,85.c$), e um astronauta em seu interior mede seu comprimento e encontra um valor de 12 m. Para um observador que se encontra na Terra, qual o tamanho da nave?

Resolução:

Temos que a velocidade da Terra em relação à nave também é de $0,85.c$, e que o comprimento próprio é igual a 12 m. Então,

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \Rightarrow L = L' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2} \Rightarrow L = L' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,85.c}{c}\right)^2} \Rightarrow L = L' \sqrt{1 - (0,85)^2}$$

$$L = 0,53.L'$$

$$L = 6,32 \text{ m} .$$

Podemos observar que houve uma redução bastante significativa da medida, onde o valor medido pelo observador em repouso é quase a metade do valor medido pelo observador em movimento.

5.1. Contração de Lorentz - FitzGerald

Vimos que as medidas de comprimento são afetadas pelo movimento relativo dos corpos, sendo isto uma consequência do segundo postulada. Então, fica o questionamento: o que acontece com um objeto que se encontra em movimento relativo a um referencial inercial? Há uma contração no material, onde as moléculas são afetadas pelo movimento,

ficando umas mais próximas das outras, ou seja, há uma alteração na estrutura do material? Ou será que é apenas a aparência visual do objeto em movimento relativo?

Antes de Albert Einstein publicar a Teoria da Relatividade Especial em 1905, os físicos George Francis FitzGerald (Irlanda, 1851 - 1901) e Hendrik Antoon Lorentz (Holanda, 1853 - 1928), propuseram a mesma relação da contração do comprimento na direção do deslocamento, porém com significado diferente. Para Lorentz e FitzGerald a contração era resultado da modificação da estrutura da matéria: o éter (meio hipotético onde a luz se propagava) afetava as forças moleculares, o que explicaria a contração do comprimento. Este argumento foi utilizado e aceito na época, pois assim explicava os resultados negativos obtidos por Michelson e Morley, na identificação do éter através do interferômetro, conforme já mencionado na seção 2.3.5.

No artigo de FitzGerald (1889), ele descreve a influência do éter na estrutura dos materiais: “...*parece ser uma suposição não improvável que as forças moleculares sejam afetadas pelo movimento [relativo ao éter] e que, em consequência, o tamanho do corpo se altere*”.

A partir da Teoria da Relatividade Especial de Einstein, a contração do comprimento passou a ter um outro significado, deixando de ser uma contração que afetaria a estrutura da matéria, e passou a ser uma contração devido à aparência visual dos objetos em movimento relativo.

Comparando a interpretação dada por FitzGerald com a de Einstein, verificamos que a primeira estava relacionada com a mudança estrutural da matéria enquanto que a segunda (Einstein) está relacionada com o ato de medir, ou seja, não ocorre uma mudança na estrutura da matéria dos corpos, mas sim uma alteração nas medidas de comprimento, pelo fato da luz possuir a mesma rapidez em todas as direções.

Pense e Responda:

18) Uma barra mantém-se paralela ao eixo x de um referencial S , movendo-se ao longo deste eixo com velocidade de $0,70.c$. O seu comprimento de repouso é de $2,0$ m. Qual será seu comprimento em S ?

19) Uma nave espacial com um comprimento de repouso de 150 m, passa por uma estação de observação com velocidade de $0,85.c$. Determine:

a) Qual o comprimento da nave medido por um observador na estação?

b) Qual o intervalo de tempo registrado pelo monitor da estação entre as passagens, por um mesmo ponto, da parte da frente e da parte traseira da nave?

20) Um avião, cujo comprimento de repouso é de 50 m, está se movendo, em relação à Terra, com uma velocidade constante de 630 m/s. Em que fração do seu comprimento de repouso parecerá encurtado para um observador na Terra?

6. ADIÇÃO DE VELOCIDADES NA RELATIVIDADE ESPECIAL

Na Relatividade Especial, como já discutimos nas seções 4 e 5, as medidas de tempo e espaço foram modificadas totalmente, e fomos obrigados a abandonar a Relatividade galileana. Como consequência, a adição de velocidades também foi alterada, até mesmo porque nenhum corpo pode possuir velocidade maior que a da luz em relação a um referencial inercial.

Vamos recordar um pouco a soma galileana de velocidades: considere um trem que se desloca com velocidade \vec{V} constante, conforme a figura 11, e uma pessoa dentro do trem deslocando-se no mesmo sentido do trem (referencial inercial S'). Um observador está em repouso em um referencial inercial S , preso ao solo.

O módulo da velocidade da pessoa que caminha no interior de trem, para quem está em repouso no solo, será:

$$v = V + v' , (16)$$

onde

V é o módulo da velocidade de S' em relação a S ;

v' é o módulo da velocidade da pessoa em relação a S' , caminhando no mesmo sentido do movimento do trem;

v é o módulo da velocidade da pessoa, como vista pelo observador em S .

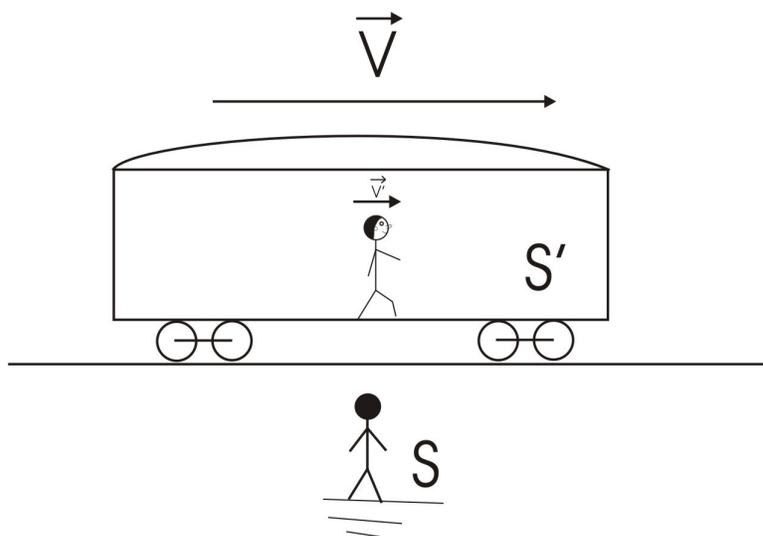


Figura 12

Em uma outra situação, onde a pessoa no interior do trem (referencial S') desloca-se em sentido contrário ao do trem (figura 12), teremos:

$$v = V - v', \quad (17a)$$

onde v' refere-se ao módulo da velocidade com que a pessoa caminha, em relação ao trem para trás, e supomos $V > v'$. Se o trem viaja tão lentamente de tal forma que $V < v'$, então o observador em S verá a pessoa deslocar-se para a esquerda com uma velocidade de módulo

$$v = v' - V. \quad (17b)$$

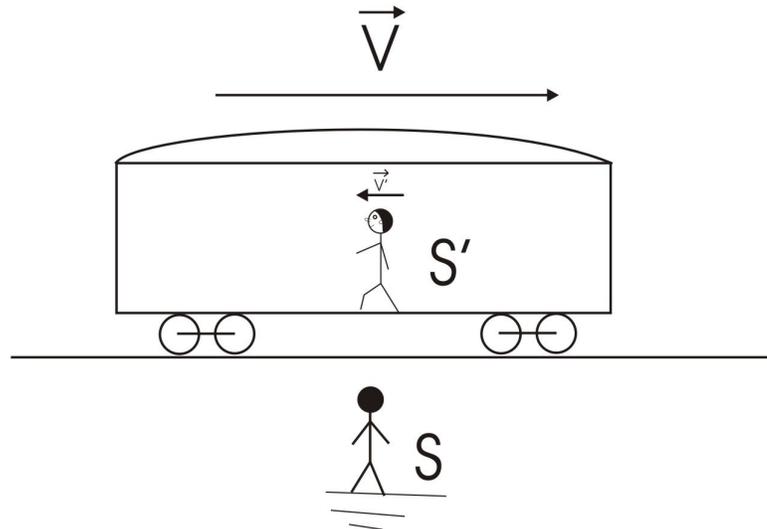


Figura 13

Para velocidades relativísticas (próximas da velocidade da luz) não podemos utilizar a adição de velocidades descrita por Galileu, pois, de acordo com o segundo postulada da Relatividade Especial, a luz desloca-se em todas as direções com a mesma rapidez c . Por exemplo, uma fonte que se desloca com rapidez $0,8.c$ em relação ao solo emite um pulso de luz com rapidez c ; então, utilizando a equação (16) calcularemos que o pulso de luz se deslocaria com rapidez $1,8.c$, em relação ao solo, ou seja, com uma velocidade maior que a velocidade da luz.

Então, para velocidades relativísticas, utilizaremos uma outra relação, a qual chamaremos de adição relativística de velocidades:

$$v = \frac{V + v'}{1 + \frac{V \cdot v'}{c^2}}. \quad (18)$$

Ou, para a determinação de v' :

$$v' = \frac{V - v}{1 - \frac{V \cdot v}{c^2}} \quad (19)$$

No exemplo citado acima, a relação (18) fornece, para $V = 0,8.c$ e $v' = c$:

$$v = c ,$$

consistente com o segundo postulado.

A equação (18) estabelece a forma de combinar velocidades compatível com os postulados da Relatividade Especial.

Exemplo 4:

Considere duas naves, A e B, que viajam com velocidades respectivas de $0,6.c$ e $0,8.c$, em relação à Terra, em sentidos opostos. Determine a velocidade relativa de uma nave em relação à outra.

Resolução:

Seja S o referencial Terra, S' o referencial preso à nave A, e considere a nave B como o objeto observado. Então, em (19), $V = 0,6.c$ e $v = -0,8.c$, já que as naves viajam, em relação à Terra, em sentidos opostos.

$$v' = \frac{0,6.c + 0,8.c}{1 + \frac{0,6.c \cdot 0,8.c}{c^2}} \Rightarrow v' = \frac{1,4.c}{1,48} \Rightarrow v' = 0,95.c$$

Pense e Responda:

21) Uma partícula se move ao longo do eixo x' do referencial S' com a velocidade de $0,50.c$. O referencial S' se move em relação ao referencial S com a velocidade de $0,60.c$. no sentido do eixo x. Os eixos x, y e z, de S, possuem as mesmas orientações dos eixos x' , y' e z' , de S', respectivamente. Qual a velocidade da partícula, conforme medida em S?

22) Duas espaçonaves movem-se em sentidos opostos com velocidades de $0,8.c$, relativas à Terra. Qual a velocidade de uma das naves relativamente à outra:

Pela Relatividade de Galileu?

Pela Relatividade de Einstein?

7. ENERGIA RELATIVÍSTICA

A Teoria da Relatividade Restrita modificou também as noções de energia. Com certeza você já viu em algum lugar o que poderíamos definir como a equação mais *pop* da Física:

$$E_0 = m.c^2 . \quad (20)$$

Mas, qual o significado desta equação?

Einstein conseguiu demonstrar que a massa de um corpo pode ser considerada uma forma de energia, ou seja, massa pode ser convertida em energia e energia pode ser convertida em massa. Este princípio é denominado de princípio da equivalência massa-energia.

Na equação (20) temos o que chamamos de energia de repouso, ou seja, a energia que um corpo possui apenas devido à sua massa, desconsiderando outras formas de energia como a energia cinética.

Agora, quando um corpo está em movimento, além da energia de repouso, devida à sua massa, terá também energia cinética, e a energia total será a soma da energia cinética com a energia de repouso. Neste caso, temos a seguinte relação:

$$E = \gamma.m.c^2$$
$$E = \frac{m.c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} . \quad (21)$$

A equação (21) é a equação (20) multiplicada pelo fator de Lorentz; então, para uma velocidade igual a zero, temos que a equação (21) se reduz à equação (20).

A energia cinética de um corpo para velocidades relativísticas é dada pela diferença entre a energia total (equação (21)) e a energia de repouso (equação (20)):

$$E_c = E - E_0$$
$$E_c = \gamma.m.c^2 - m.c^2$$
$$E_c = m.c^2.(\gamma - 1) . \quad (22)$$

Nas reações nucleares, por exemplo, a equação de equivalência massa-energia de Einstein é facilmente verificada, pois os núcleos e partículas subnucleares interagem, ocorrendo conversão de massa em energia, e vice-versa.

Exemplo 5:

Consideremos uma reação nuclear, onde a massa final após a reação seja menor em um grama do que a massa inicial. Determine a equivalência em energia para esta variação de massa.

Resolução:

Temos:

$$m = 1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg};$$

$$c = 3.10^8 \text{ m/s}.$$

$$E_0 = m.c^2 \Rightarrow E_0 = 10^{-3} \cdot (3.10^8)^2 \text{ J} \Rightarrow E_0 = 10^{-3} \cdot 9.10^{16} \text{ J}$$

$$E_0 = 9.10^{13} \text{ J}.$$

Para termos idéia, com esta quantidade de energia liberada poderíamos abastecer, com energia elétrica, 100.000 residências de porte médio durante um mês.

Exemplo 6:

Considere uma maçã de massa igual a 150 g, que seja transformada integralmente em energia utilizada para acender uma lâmpada de 100 W. Por quanto tempo permanecerá acesa esta lâmpada? (Teoricamente isto é possível, mas não há perspectiva próxima para sua realização.)

Resolução:

Inicialmente, determinaremos a energia de repouso da maçã.

Temos:

$$m = 150 \text{ g} = 1,5.10^{-1} \text{ kg};$$

$$c = 3.10^8 \text{ m/s}.$$

$$E_0 = m.c^2 \Rightarrow E_0 = 1,5.10^{-1} \cdot (3.10^8)^2 \text{ J} \Rightarrow E_0 = 1,5.10^{-1} \cdot 9.10^{16} \text{ J}$$

$$E_0 = 1,35.10^{16} \text{ J}.$$

Temos que lembrar que potência é obtida pela razão:

$$P = \frac{E_0}{\Delta t}.$$

Logo,

$$\Delta t = \frac{E_0}{P}.$$

Então:

$$\Delta t = \frac{13,5 \cdot 10^{15}}{100} \text{ s} \Rightarrow \Delta t = 1,35 \cdot 10^{14} \text{ s} .$$

$\Delta t = 1,35 \cdot 10^{14}$ s são mais de 4 milhões de anos!

Pense e Responda:

23) A energia consumida por uma casa comum, por mês, é da ordem de 300 kWh (quilowatt hora). Deste modo, lembrando que $1\text{kWh}=3,6 \cdot 10^6$ joules, esta energia equivale, em quilogramas, a aproximadamente:

24) Qual o erro percentual que se comete quando se calcula a energia cinética por $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ em vez de $(\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2$, para uma partícula com velocidade:

a) $0,1 \cdot c$?

b) $\frac{2}{3} \cdot c$?

25) Qual a velocidade de um próton que possui energia total igual a 1.800 MeV? Considere $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, e a massa do próton igual a $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

26) A partir da relação da energia relativística, prove que um corpo jamais poderá chegar à velocidade da luz. Por que não é possível atingir a velocidade da luz?

8. PARADOXO DOS GÊMEOS

O paradoxo consiste no seguinte: dois irmãos gêmeos, José e Carlos, crescem juntos até a idade de 25 anos, quando Carlos é escolhido para realizar uma viagem a uma estrela que fica distante 15 anos-luz da Terra. Para realizar a viagem será utilizado um foguete que atinge a velocidade de 99% da velocidade da luz ($0,99.c$). Para José, na Terra, o tempo de viagem de Carlos será de 30,30 anos (tempo dilatado) (verifique a validade desta afirmação). Para Carlos, que viajou, o tempo transcorrido (tempo próprio) será menor.

Pela equação (11), temos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}, \text{ onde } \Delta t \text{ é o tempo dilatado e } \Delta t' \text{ é o tempo próprio.}$$

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$$

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,99.c}{c}\right)^2}$$

$$\Delta t' = 0,14 \cdot \Delta t$$

$$\Delta t' = 4,24 \text{ anos .}$$

Para Carlos, que viajou, terão sido transcorridos apenas 4,24 anos, ou seja, sua idade após a viagem será de 29,24 anos, enquanto que José, que permaneceu na Terra, terá 55,30 anos, ou seja, José será mais velho que Carlos aproximadamente 26 anos.

Agora, considere uma situação contrária. Vamos colocar o nosso referencial S em Carlos, que está dentro do foguete. Desta forma, Carlos verá seu irmão José se afastando. Nesta situação consideramos o foguete em repouso, e o tempo próprio passa a ser o tempo medido por José, que está em movimento em relação a Carlos, que medirá o tempo dilatado.

Então, eis o paradoxo: dependendo do referencial que escolhermos, José ou Carlos estará mais velho ao final da viagem. Como resolver este paradoxo? É simples: José está na Terra, e podemos considerar que este é um referencial inercial. Já Carlos, que está no foguete, não pode ser considerado como um referencial inercial, pois, para atingir a velocidade de $0,99.c$, e para mudar de sentido de movimento, o foguete tem de ser

acelerado. Não temos paradoxo, já que não estamos comparando observações a partir de dois referenciais inerciais.

O problema *não é*, pois, simétrico. Assim, quando se reencontram, José e Carlos não terão que ter a mesma idade, já que José permaneceu em um referencial inercial, enquanto Carlos sofreu acelerações.

9. TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

O estudo da Teoria da Relatividade Especial restringe-se apenas a referenciais inerciais, ou seja, referenciais não acelerados. Mas, como se comportam sistemas acelerados? Em 1907, Einstein propôs o que denominou de princípio da equivalência, o qual se tornou ponto de partida para uma nova teoria da Gravitação. Em 1916, ele publicou a Teoria da Relatividade Geral, que passou a considerar sistemas acelerados.

O princípio da equivalência consiste no seguinte: um referencial acelerado uniformemente em linha reta equivale a um campo gravitacional uniforme, ou seja, um foguete acelerado com $a = g$ reproduz o campo gravitacional terrestre. O princípio da equivalência é fortemente confirmado pelas experiências.

Podemos concluir o seguinte: para um observador que esteja no interior de um recinto fechado, não existe nenhuma experiência física que permita distinguir se o local está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se é um referencial acelerado.

Uma das conseqüências da Relatividade Geral é o que se denomina de curvatura da trajetória da luz, a qual foi comprovada em um eclipse total do Sol em 1919.

A Teoria da Relatividade Geral é fundamental para muitos campos de pesquisa, tanto teóricos como práticos, dentre os quais podemos destacar a Cosmologia, a Astrofísica e a procura da teoria do Campo Unificado. Muito já se descobriu, e muito ainda há para ser descoberto com os fundamentos das teorias da Relatividade (Especial e Geral).

Como conclusão, podemos destacar que o impacto filosófico da Teoria da Relatividade sobre o nosso pensamento tem sido profundo desde sua criação até nossos dias, mudando radicalmente nossa visão de mundo e do Universo.

REFERÊNCIAS

1. ARRUDA, S. M. Sobre as origens da relatividade especial: relação entre quanta e a relatividade especial em 1905. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 13, n. 1: p. 32-47, abril 1996.
2. BARNETT, K. *O universo e o Dr. Einstein*. 3.ed. São Paulo: Melhoramentos, [19_?]. 98 p.
3. GASPAR, A. *Física*. São Paulo: Ática, 2002. v.3: Eletromagnetismo e física moderna.
4. HELLMAN, H. *Grandes debates da ciência: dez das maiores contendas de todos os tempos*. São Paulo: UNESPE, 1998. 277p.
5. LANDAU, L.; RUMER, Y. *Qué es la teoria de la relatividad*. Moscou, MIR, 1969. 63 p.
6. MARTINS, R. de A. Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do Eletromagnetismo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 5, p. 49-57, jun. 1988. n. especial.
7. OSTERMANN, F. ; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 21, n. 1: p. 83-102, abr.2004.
8. OSTERMANN, F. ; RICCI, T. F. Relatividade Restrita no ensino médio: contração de Lorentz-FitzGerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 19, n. 2: p. 176-190, ago. de 2002.
9. RICCI, T. F. *Teoria da relatividade especial: física para secundaristas*. Porto Alegre, Instituto de Física –UFRGS, 2000. 36 p.
10. THUILLIER, P. *De Arquimedes a Einstein: a face oculta da investigação científica*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994. 260 p.
11. TORRES, C. M. A.; et al. *Física: ciência e tecnologia*. São Paulo: Moderna, 2001. 665 p.

Apêndice B

Relatividade: a passagem do enfoque galileano
para a visão de Einstein

Texto para professores

Professor Jeferson Fernando de Souza Wolff

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| 1. Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein - Material de apoio para aplicação do material didático. | 151 |
| 2. Tópico: pensamento aristotélico e Relatividade galileana..... | 153 |
| 3. Tópico: Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos..... | 154 |
| 4. Tópico: Histórico da Eletricidade e Magnetismo até a unificação | 155 |
| 5. Tópico: O Problema do eletromagnetismo com a Mecânica Clássica e a origem da Relatividade Especial | 157 |
| 6. Tópico: Relatividade da simultaneidade..... | 159 |
| 7. Tópico: Dilatação temporal e contração do espaço..... | 161 |
| 8. Tópico: Adição de velocidades..... | 164 |
| 9. Tópico: Energia relativística..... | 164 |
| 10.Tópico: Paradoxo dos gêmeos..... | 165 |
| 11.Tópico: Relatividade Geral..... | 166 |
| 12.Tópico: Exercícios | 167 |
| 13.Considerações finais..... | 167 |

1. RELATIVIDADE: A PASSAGEM DO ENFOQUE GALILEANO PARA A VISÃO DE EINSTEIN - MATERIAL DE APOIO PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL DIDÁTICO.

Professor(a)!

Se você pretende contemplar o ensino da Teoria da Relatividade Especial em suas aulas de Física no ensino médio, este material poderá auxiliá-lo no desenvolvimento desse tópico. Temos aqui um material de apoio que deverá ser utilizado juntamente com o texto *Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein*, que foi elaborado para alunos de ensino médio e faz parte da dissertação de Mestrado de Jeferson Wolff (Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física, UFRGS, 2005).

Mas por que ensinarmos Teoria da Relatividade Especial a alunos do ensino médio?

A Física que comumente se ensina em nossas escolas de ensino médio é uma Física defasada em pelo menos 150 anos. Ensinamos aos nossos alunos: Mecânica, Hidrostática, Óptica, Eletricidade e Magnetismo e, quando muito, Eletromagnetismo. Quanto à Física Moderna, que foi desenvolvida no último século, na maioria das vezes sequer é comentada em sala de aula.

Porém, nossos alunos, devido à facilidade de obtenção de informação (jornais, revistas e principalmente internet) possuem muita curiosidade relacionada a assuntos de Física Moderna, como a possibilidade da viagem no tempo e o surgimento do Universo. Então, como formadores de opinião, temos a obrigação de trabalhar o ensino da Física Moderna ainda no ensino médio.

Muitos professores argumentam que não se ensina Física Moderna para o nível médio devido à falta de conhecimento matemático. Mas isto não é problema, pois depende da abordagem escolhida. Se o principal enfoque for mais conceitual, o professor surpreender-se-á com a simplicidade de tais conceitos. A maior dificuldade (e também onde os alunos acabam apresentando maior interesse) é a forma inusitada de muitos conceitos, ou melhor, a mudança conceitual que deve ocorrer e que em muitas situações contraria o nosso senso comum.

Optamos por abordar o ensino da Teoria da Relatividade Especial por considerá-la um marco fundamental da Física Moderna. A abordagem dada no texto dos alunos possui como introdução a gênese da Teoria da Relatividade Especial, na qual começamos com o pensamento aristotélico, passando por grandes pensadores como Galileu, Newton e Maxwell, chegando até as conclusões de Einstein. O principal enfoque é apresentar aos alunos que a Física é uma contínua construção do pensamento humano, onde uma teoria está diretamente associada a outras teorias já existentes. Tivemos o cuidado de apresentar a história da evolução do conhecimento da Física da forma mais clara possível, para com isso deixar claro que cientistas como Newton e Einstein foram excepcionais, mas não descobriram suas teorias por exclusiva genealidade.

Aconselhamos que este conteúdo seja desenvolvido com alunos da etapa final do ensino médio, pois já terão conhecimento de vários assuntos que abordaremos na gênese da Relatividade. Com isso, você terá apenas a preocupação de mostrar a parte histórica da evolução do conhecimento. Também consideramos que os alunos desta fase já estão mais maduros, com capacidade para compreender muitos dos conceitos abordados que contrariam o senso comum.

São necessárias aproximadamente vinte horas-aula para o desenvolvimento do presente material. A seguir, segue sugestão do número de aulas por tópico.

| Assunto | Número de aulas |
|--|------------------------|
| Pensamento aristotélico e Relatividade galileana | 3 aulas |
| Isaac Newton e movimento relativo dos corpos | 1 aula |
| Histórico da Eletricidade e Magnetismo até a unificação | 2 aulas |
| Problema do Eletromagnetismo com a mecânica clássica e origem da Relatividade Especial | 2 aulas |
| Relatividade da simultaneidade | 1 aula |
| Dilatação temporal e Contração do espaço | 3 aulas |
| Adição de velocidades | 1 aula |
| Energia relativística | 2 aulas |
| Paradoxo dos gêmeos | 1 aula |
| Introdução à Relatividade Geral | 1 aula |
| Aulas para resolução de exercícios | 3 aulas |

2. TÓPICO: PENSAMENTO ARISTOTÉLICO E RELATIVIDADE GALILEANA

Este tópico é tratado nos capítulos *2.1 A Relatividade galileana e 2.1.1. Transformações galileanas*. Começamos ilustrando o paradoxo de Zenão, que trata da velocidade relativa dos corpos. O paradoxo é respondido quando conseguimos verificar que a relatividade dos movimentos é questão fortemente ligada ao referencial adotado.

Achamos importante descrever o pensamento aristotélico, pois pode-se verificar que muitos alunos ainda possuem esta forma de pensar. O principal enfoque que se deve dar é que a forma como Aristóteles concebia a Natureza era puramente filosófica, como por exemplo, o fato de a matéria ser composta basicamente por quatro elementos: fogo, ar, água e terra. Estes elementos tinham posições determinadas no Universo, chamadas lugares naturais. Este pensamento permaneceu sem ser contestado mais veementemente até o século XVI.

O pensamento filosófico aristotélico começou a ser deixado de lado principalmente a partir de Galileu, quando a forma de se fazer ciência passou a ser mais matemática e com a valorização da experiência. É importante salientar neste ponto que não existe um método científico, pois muitos alunos acreditam em sua existência e que este deve ser seguido fielmente, tendo como primeiro passo a observação para somente em seguida se fazer uma lei que descreva tal observação. Para ilustrar que nem sempre primeiro se faz a observação para somente em seguida fazer uma lei que descreva tal fenômeno, cite o exemplo do Big Bang, pois existe uma teoria para o surgimento do Universo, mas nenhum dos que elaboraram tal teoria observou o Big Bang.

Outro ponto importantíssimo de ser frisado é o de se saber definir um referencial inercial, que é essencial para que se trabalhe a Relatividade de Einstein.

Quanto à Relatividade galileana (denominação dada por Einstein), os principais enfoques que devem ser trabalhados são os que se referem a tempo e espaço como absolutos, ou seja, um independe do outro, tendo como consequência a simultaneidade de eventos. Além disso, é importante trabalhar com os alunos a adição de velocidades da Relatividade galileana.

Sugerimos que para ilustrar este tópico sejam resolvidos os exercícios 1, 2 e 3 em aula.

Respostas dos exercícios deste tópico:

1) **R: 7,5 km, em relação à origem de S.**

2) **R: As três principais características existentes na Relatividade galileana são de que tempo, espaço e simultaneidade de eventos são absolutos, ou seja, independem do referencial em que forem medidos.**

3) **R: Para que tenhamos um referencial inercial, a resultante das forças exercidas sobre este referencial deve ser nula, ou seja, o referencial não é acelerado, podendo estar em repouso ou em movimento uniforme em relação a outro referencial inercial. Já um referencial não inercial é acelerado.**

4) **R: Utilizaria, por exemplo, uma esfera. Colocaria em uma determinada posição e verificaria se a resultante das forças exercidas sobre a esfera é nula. Assim, seria verificado se a esfera permaneceu na mesma posição ou não. Se permaneceu, significa que temos um referencial inercial; se houve mudança na sua posição, é um referencial não inercial.**

3. TÓPICO: ISAAC NEWTON E O MOVIMENTO RELATIVO DOS CORPOS

Este tópico inicia descrevendo um pouco a vida de Isaac Newton, um dos maiores cientistas de todos os tempos.

Os principais objetivos deste tópico são a descrição de que massa e aceleração independem do referencial em que estejam sendo medidos. Outro ponto importante é que as Leis de Newton são iguais em qualquer sistema de referencial inercial que servirá de base para a elaboração da Teoria da Relatividade Especial, sendo então importante salientar que as leis de Newton, assim como qualquer lei da Física, deverão ser iguais em qualquer referencial inercial.

Deve-se destacar que Newton elaborou suas leis a partir do conhecimento existente na época e o próprio Newton chegou a falar que, se enxergou mais longe, era porque estava sobre ombros de gigantes.

Finalmente, observar as transformações de velocidades de um referencial para outro, conforme apresentado na seção 2.2, principalmente as equações (5), (6) e (7).

4. Tópico: Histórico da Eletricidade e Magnetismo até a unificação

Para o desenvolvimento deste tópico deve-se abordar as seções 2.3. *O Eletromagnetismo*, 2.3.1. *A Eletricidade*, 2.3.2. *O Magnetismo*, 2.3.3. *O Eletromagnetismo - a unificação* e 2.3.4. *O Eletromagnetismo e Maxwell*.

Este tópico deve ser desenvolvido, tendo-se como principal objetivo a construção e evolução do pensamento sobre estes dois ramos da ciência, até a sua unificação, que trouxe consigo alguns paradoxos, entre os quais um resultou na teoria da Relatividade Especial.

Mas por que estudar a evolução do eletromagnetismo para a construção do conhecimento da Relatividade Especial?

Como bem sabemos, a luz é uma onda eletromagnética, mas isto somente foi concluído após a obtenção das equações de Maxwell. O segundo postulado refere-se diretamente à constância da velocidade da luz no vácuo, sendo assim uma conclusão direta das equações de Maxwell.

Tanto a parte histórica da eletricidade, quanto a do magnetismo têm seu início na Grécia, onde ainda não se conhecia bem a diferença entre os fenômenos elétricos e magnéticos. William Gilbert, em 1600, foi quem conseguiu fazer a separação entre estes dois ramos da Física, diferenciando os fenômenos elétricos dos fenômenos magnéticos.

Mas, as fortes evidências levaram Oesterd à observação de que estes dois fenômenos estão intimamente ligados. Aqui cabe ressaltar que Oesterd não descobriu por acaso a relação entre a Eletricidade e o Magnetismo, pois já conhecia indícios da relação entre estes dois fenômenos. Neste ponto é importante salientar ao aluno que esta descoberta, assim como outras, não são obras da mera casualidade, mas sim que já existia um conhecimento prévio que favoreceu a formação da nova teoria.

Com relação às equações de Maxwell, é necessário destacar que ele conseguiu unificar de forma matemática a Eletricidade e o Magnetismo com relações que já haviam sido desenvolvidas por outros cientistas. Maxwell também unificou a Eletricidade com o Magnetismo e a Óptica. É importante salientar esta questão, pois hoje estamos à procura de uma lei que consiga unificar todos os ramos da Física, algo que Maxwell conseguiu realizar, com três ramos diferentes da ciência.

Com o estabelecimento ondulatório da natureza da luz, surge um conflito para a época, pois, até então, apenas se conheciam ondas mecânicas que necessitam de um meio para se propagar. Mas as ondas eletromagnéticas, de acordo com as equações de Maxwell, não necessitavam de meio para sua propagação.

É importante reforçar que este conflito surgiu em uma época em que se achava que não havia mais nada a ser desenvolvido e o que conhecimento científico havia chegado ao fim.

Então, eis que surgiu um conflito: o de que uma onda eletromagnética não necessita de um meio para se propagar. Aqui o professor deve enfatizar bem a origem deste conflito e a procura para salvar o conhecimento da época (a Mecânica e as equações de Maxwell, que estavam muito bem consolidados). Apesar de ser apresentado por muitos livros, não é este o conflito que dá origem à mudança conceitual que fez surgir a Teoria da Relatividade Especial.

Sugere-se que se resolva as questões 5, 6 e 7 em aula, gerando um debate junto aos alunos.

Respostas dos exercícios deste tópico:

5) R: O desenvolvimento de uma nova teoria não obedece a nenhum método científico, ou seja, não há uma receita para se fazer ciência. Afirmar que todo o conhecimento científico sempre parte de uma observação é um grande equívoco, pois temos vários exemplos que ilustram que primeiro foi desenvolvida a teoria para somente depois se fazer a observação, isto quando é possível. Um exemplo é a teoria do Big Bang.

6) R: Exemplo: A teoria do Eletromagnetismo desenvolveu-se a partir dos conhecimentos já existentes da Eletricidade e do Magnetismo. Já a teoria da Relatividade foi desenvolvida a partir das equações de Maxwell e de conflitos com a Relatividade galileana.

7) R: Maxwell conseguiu unificar com suas equações a Eletricidade, o Magnetismo e a Óptica, no Eletromagnetismo.

8) R: O conflito que surgiu com o estabelecimento da natureza ondulatória da luz era que as equações de Maxwell descreviam uma onda que podia se propagar no vácuo. Então, eis o conflito da época: como uma onda irá se propagar mesmo no

vácuo, se apenas se tinha conhecimento de ondas mecânicas que necessitam de um meio material para se propagar?

5. TÓPICO: O PROBLEMA DO ELETROMAGNETISMO COM A MECÂNICA CLÁSSICA E A ORIGEM DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Para o desenvolvimento deste tópico deve-se abordar os capítulos 2.3.5. *Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica Clássica* e 2.4. *Einstein e a origem da Relatividade Especial*.

Ao chegar a este tópico, é normal que o aluno comece a questionar: Mas afinal o que é esta tal de teoria da Relatividade Especial? Pois até o momento já foram trabalhadas oito aulas e nada ainda foi abordado sobre a Relatividade Especial em específico.

Desse modo, este tópico torna-se essencial, pois os assuntos desenvolvidos até o momento serão fundamentais para o entendimento de onde e por que surgiu esta teoria.

O professor deve começar abordando a dificuldade em se detectar o tal do éter, o qual seria um meio hipotético onde a luz se propagaria. Comentar das tentativas de Michelson e Morley em detectar o éter através de um instrumento denominado interferômetro. Mas, pode-se observar que no texto dos alunos não nos preocupamos em descrever como era o funcionamento deste instrumento e as possíveis explicações dadas por Michelson e Morley para a não detecção do éter. Isto porque não foi a partir dos resultados negativos destes experimentos que Einstein elaborou a sua teoria da Relatividade.

Existia um outro paradoxo que consistia no seguinte: as equações de Maxwell descreviam perfeitamente os fenômenos elétricos e magnéticos num determinado referencial inercial como manifestação de um único fenômeno. Porém, quando passamos para um outro referencial inercial, utilizando as transformadas de Galileu, as equações de Maxwell forneciam resultados conflitantes. Explicações mais detalhadas deste paradoxo podem ser obtidas em RICCI, Trieste F. **Física para secundaristas: Teoria da Relatividade Especial**. Porto Alegre, Instituto de Física –UFRGS, 2000. p. 6-8.

Quando for tratada a seção 2.4., deverá ser dada uma grande ênfase nos dois postulados da Relatividade, descrevendo quais foram algumas das conseqüências que serão

abordadas nos próximos capítulos, como por exemplo, que tempo e espaço deixam de ser absolutos e passam a depender do referencial em que forem medidos.

Além desse material, indicamos para incrementar essa aula uma pesquisa no *site* www.if.ufrgs.br/einstein, do Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos do Instituto de Física da UFRGS. Aí você encontrará uma biografia de Einstein, assim como uma abordagem interessante da teoria da Relatividade Especial. Este *site* pode ser também uma ótima fonte de pesquisa para os alunos.

Ao final desse tópico sugerimos que sejam resolvidos os exercícios 9, 10 e 11 em aula.

Respostas dos exercícios deste tópico:

9) R: Além do conflito existente referente ao comportamento ondulatório das ondas eletromagnéticas, também surgiu um outro conflito que consistia no fato das equações de Maxwell não apresentarem o mesmo resultado para dois referenciais inerciais distintos, o que levava à conclusão de que existia um referencial inercial privilegiado: ou as equações de Maxwell deveriam ser modificadas ou a Relatividade galileana deveria ser reescrita.

10) R: Além dos já unificados pelo Eletromagnetismo (Eletricidade, Magnetismo e Óptica), conseguiu relacionar a Mecânica com o Eletromagnetismo.

11) R:

1) As leis da Física são iguais em qualquer referencial inercial, ou seja, não existe referencial inercial preferencial.

2) A luz sempre se propaga no espaço vazio com uma rapidez definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor.

O primeiro postulado está associado diretamente às leis da Mecânica, Termodinâmica, Óptica e do Eletromagnetismo, ou seja, é uma generalização do princípio da Relatividade galileana e de Newton que se aplicava apenas à Mecânica. Esta generalização de várias leis somente foi possível graças à modificação dos conceitos de espaço e tempo.

O segundo postulado trouxe, entre algumas conseqüências, a de que nenhuma partícula pode se deslocar com velocidade superior à da luz.

12) R: $0,7777.c$

6. Tópico: Relatividade da simultaneidade

Este tópico deve ser abordado utilizando-se o capítulo 3. *Relatividade da Simultaneidade*. Tem-se como principal objetivo que o aluno, ao final deste tópico, seja capaz de compreender que dois eventos que são simultâneos em um determinado referencial inercial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial. Como sugestão didática, reproduza a figura 7 do texto dos alunos, para ilustrar a relatividade da simultaneidade.

Aconselha-se resolver em aula os exercícios 13 e 14.

Respostas dos exercícios deste tópico:

13. R: Devido à invariância da rapidez da luz, ou seja, a luz propaga-se em todas as direções com a mesma rapidez em qualquer referencial inercial. Se a luz tivesse velocidade infinita, aí teríamos simultaneidade de eventos em qualquer referencial inercial.

14. R: Sim, desde que esses eventos não ocorram no mesmo lugar do espaço. Caso dois eventos ocorram em um mesmo lugar não é possível uma inversão de sua ordem cronológica, ou seja, não é possível que o evento B ocorra antes que o evento A em qualquer outro referencial.

Se os eventos não ocorrerem no mesmo local do espaço, poderemos ter uma inversão de observação desses eventos.

Na a Figura 1, o observador S_1 , que se encontra no interior do trem que se desloca com uma velocidade \vec{V}_1 para a direita, irá observar primeiro a ocorrência do evento B e, após, a do evento A.

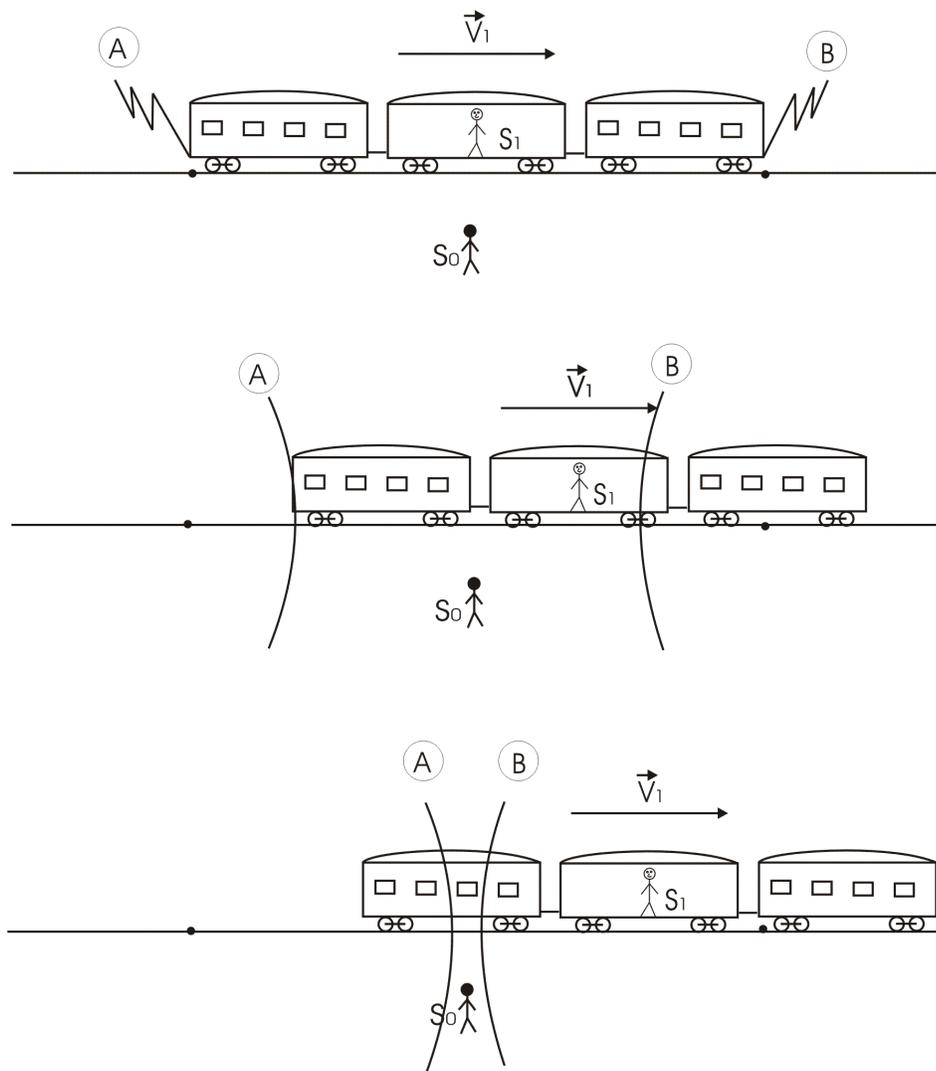


Figura 14

Já na Figura 2 o observador S_2 , que se encontra no interior do trem que se desloca com uma velocidade \vec{V}_2 para a esquerda, irá observar primeiro a ocorrência do evento A e, após, a do evento B.

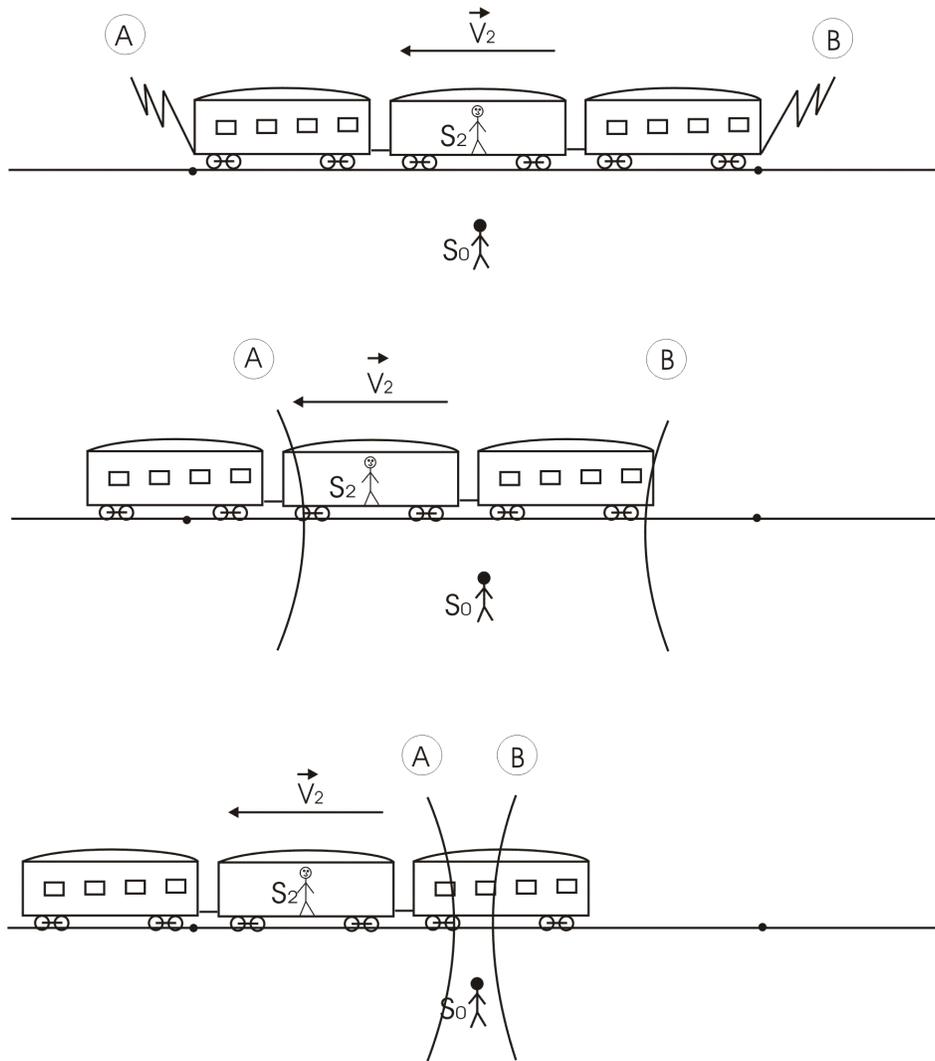


Figura 15

Assim, podemos concluir que o observador S_0 , nas duas situações, vê os dois eventos simultaneamente, e os observadores S_1 e S_2 verão os eventos em ordem cronológica inversa. Para as duas situações, consideramos V_1 e V_2 iguais: $V_1 = V_2 = V$.

7. TÓPICO: DILATAÇÃO TEMPORAL E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Este tópico deve ser abordado utilizando o capítulo 4. *Dilatação temporal*, 5. *Contração do Espaço* e 5.1. *Contração de Lorentz – FitzGerald*. O principal objetivo deste

tópico é que os alunos consigam compreender que tempo e espaço deixam de ser absolutos e passam a ser relativos, ou seja, dependerão do referencial em que forem medidos.

Sugerimos que se faça a dedução da equação (11), conforme está apresentada no capítulo 4. Você pode verificar que a dedução é bem simples, exigindo-se apenas o conhecimento do teorema de Pitágoras. Consideramos que é necessário realizar esta dedução com os alunos, pois fica muito mais claro o porquê da importância dos referenciais inerciais para a dilatação temporal.

Para o aluno deve ficar bem claro que o tempo passa mais lentamente para quem está em movimento retilíneo e uniforme em relação a um referencial inercial (tempo próprio). Refaça os exemplos 1 e 2 e recomendamos que os exercícios 15 e 17 sejam feitos em aula com os alunos.

Ao final da apresentação desta primeira parte do tópico, muitos alunos começarão a questionar a validade da Relatividade Especial, pois para o nosso cotidiano, não verificamos tal mudança temporal de um referencial inercial para outro. Pode-se dar uma resposta bem simples, pois para nós as velocidades são insignificantes em comparação à velocidade da luz.

Quanto à contração do comprimento, é uma consequência direta do segundo postulado. Assim como a dilatação temporal faça também a dedução da equação (15) com os alunos. É importante salientar que o comprimento próprio é o comprimento medido para quem está em repouso em relação ao objeto medido, e o comprimento contraído é o comprimento medido para quem está em movimento relativo.

Existem duas interpretações dadas para a contração do comprimento: a primeira, dada por Lorentz e FitzGerald, onde a contração era resultado da modificação da estrutura da matéria: o éter (meio hipotético onde a luz se propagava) afetava as forças moleculares; e a segunda, dada por Einstein, onde a contração do comprimento passou a ter um outro significado, deixando de ser uma contração que afetaria a estrutura da matéria e passou a ser uma contração devido à aparência visual dos objetos em movimento relativo. Muitos livros de ensino médio ainda dão uma abordagem onde o comprimento dos corpos é afetado pelo movimento, ou seja, que há uma diminuição do comprimento no sentido do movimento. Mas é importante deixar claro que não ocorre uma mudança na estrutura, uma diminuição do comprimento, mas sim uma contração que não passa de uma aparência visual, que irá depender do referencial em que medirmos.

É importante que se refaça o exemplo 3 e os exercícios 18 e 19 em aula, relacionados com a contração do comprimento.

Gostaríamos de ressaltar que as deduções apresentadas no texto dos alunos não foram as mesma utilizadas por Einstein para a dilatação temporal, nem para a contração do comprimento. Utilizamos estas duas deduções por considerarmos serem mais didáticas para o entendimento de nosso aluno. Caso esteja interessado, sugerimos que observe a dedução utilizada por Einstein, que foi elaborada por Lorentz, em RESNICK, Robert. **Introdução à Relatividade Especial**; São Paulo, Polígono, 1971. Capítulo 2.2 *Dedução das equações de Transformação de Lorentz*. Páginas 60-66.

Como exemplo de aplicação da Teoria da Relatividade Especial, utilize o da detecção dos múons, partículas originadas pelos raios cósmicos que se deslocam com velocidade aproximadamente igual à da luz com um tempo de vida muito pequeno, da ordem de $2,0 \cdot 10^{-6}$ s, o tempo próprio do múon. Sendo assim, antes que a partícula se desintegre por completo, percorrerá uma distância de aproximadamente 600 m, comprimento próprio do múon, uma distância muito menor que a altura da atmosfera terrestre. Porém, uma quantidade de múons muito maior que a esperada consegue atingir a superfície da Terra e a explicação para este paradoxo é a Relatividade Especial, pois ocorre uma dilatação temporal (tempo dilatado) para quem está na Terra, ou seja, na verdade, o múon percorre uma distância maior para que possa atingir a superfície da Terra, isto sendo uma consequência da dilatação temporal.

Respostas dos exercícios deste tópico:

15. R: 0,87.c

16. R: 20 anos.

17. a) R: 0,999999875.c

b) Se a viagem for realizada em círculos, a espaçonave deixará de ser um referencial inercial e passará a ser um referencial não inercial, mesmo que permaneça se deslocando com rapidez constante. Então esse fenômeno não pode ser descrito pela Relatividade Especial.

18. R: 1,43 m

19. R: a) 78,95 m

b) $3,1 \cdot 10^{-7}$ s.

20. R: $1,05 \cdot 10^{-5}$ %.

8. TÓPICO: ADIÇÃO DE VELOCIDADES

Para este tópico, deve-se abordar o capítulo 6. *Adição de velocidades na Relatividade Especial* e deve-se começar lembrando a adição de velocidades de Galileu. Deve-se ainda refazer o exemplo que é apresentado neste capítulo, onde teremos um resultado para a velocidade relativa superior à velocidade da luz, o que está em desacordo com as conseqüências da Relatividade Especial.

Para a adição de velocidades, devemos utilizar as equações (18) e (19). Não realizamos a dedução destas equações por considerarmos um tanto complexa para alunos de ensino médio. Mas é importante que se refaça o exercício anterior que contradizia o segundo postulado e verificar que utilizando a equação (18) o valor do resultado da velocidade relativa é igual à velocidade da luz.

Neste tópico é importante salientar, para que não gere confusão junto aos alunos, que:

V é a intensidade da velocidade de S' em relação a S ;

v' é a intensidade da velocidade da pessoa em relação a S' , deslocando-se no mesmo sentido do movimento;

v é a intensidade da velocidade da pessoa, como vista pelo observador em S .

Aconselhamos que se refaça o exemplo 4 e o exercício 22 em aula.

Respostas dos exercícios deste tópico:

21. R: 0,85.c

22. R: a) 1,6.c

b) 0,98.c

9. TÓPICO: ENERGIA RELATIVÍSTICA

Este tópico contempla o capítulo 7 do texto dos alunos. Temos como principal objetivo que o aluno seja capaz de compreender a relação entre massa e energia apresentada pela Relatividade Especial.

Assim como no capítulo 6, onde não fizemos a dedução das equações, aqui também optamos em não realizar a dedução da equação que relaciona energia total de um corpo. Estamos mais preocupados com a interpretação desta relação, com seu significado teórico.

É essencial destacar que a equação (21) tem o significado de que à medida que um corpo aumenta a sua velocidade, aumenta o seu conteúdo energético. A explicação para que um corpo não possa atingir velocidades superiores à da luz é devido ao fato de que seria necessária uma quantidade infinita de energia. Utilizando a equação (21), faça junto com os alunos um exemplo utilizando $v = c$ e verifique que o denominador se anula. Se o denominador de uma função tende para zero, isto implica que o resultado desta equação tende para o infinito.

Uma interpretação dada por muitos autores é a de que existe uma massa relativística. Mas o que consideramos mais coerente é identificarmos a energia de repouso (equação (20)) e verificarmos que à medida que um corpo aumenta a sua velocidade, temos um aumento na energia cinética desse corpo e, no caso de objeto de massa não nula, sua energia tende a um valor infinito enquanto a velocidade se aproxima de c . O próprio Einstein, inicialmente, adotou a interpretação de Lorentz de massa relativística, para logo em seguida abandoná-lo como inconveniente.

Resolva em aula o exemplo 6 e os exercícios 23, 25 e 26.

Respostas dos exercícios deste tópico:

23. R: 1,2. 10^{-5} g.

24. R: a) 0,8%

b) 53,7%

25. R: 0,85.c

26. R: Será necessária uma quantidade infinita de energia para qualquer corpo que possua massa.

10. TÓPICO: PARADOXO DOS GÊMEOS

Este tópico contempla o capítulo 9. *Paradoxo dos Gêmeos*. Optou-se por escolher o paradoxo dos gêmeos por este ser um clássico dentro da Relatividade Especial.

O paradoxo consiste no seguinte: Dois gêmeos: um fará uma viagem e o outro permanecerá em Terra. O que vai viajar, desloca-se com velocidade relativística. Quando retorna para a Terra, encontra seu irmão gêmeo mais envelhecido que ele. Muitos textos consideram que este é o paradoxo: como que seu irmão gêmeo terá envelhecido mais que ele? Mas, quanto a isso, se fizermos os cálculos conforme encontra-se no capítulo 9 do texto dos alunos, não há nenhum problema, ou seja, está de acordo com a Relatividade Especial. Claro que para nosso senso comum isto é quase um absurdo. Mas, na realidade, se escolhermos como referencial em repouso a Terra, quem estará em movimento é a nave e quem permaneceu em Terra irá envelhecer mais rapidamente. Porém, se escolhermos a nave como referencial inercial em repouso, verificaremos que, nesta situação, quem está em movimento será o irmão que permaneceu na Terra e, agora, quem irá envelhecer mais rapidamente será quem permaneceu na nave. Então, eis o paradoxo: dependendo do referencial que escolher, um ou outro irmão irá envelhecer mais rapidamente. Quem de fato envelheceu mais será o irmão que permaneceu na Terra, pois o problema não é simétrico, ou seja, a nave não pode ser considerada um referencial inercial, pois terá momentos de aceleração, para alterar a velocidade, inclusive porque, retornando à Terra não terá sempre uma trajetória retilínea.

Para este tópico, achamos importante reservar uma aula inteira, pois é importante esclarecer qual é o paradoxo e como resolvê-lo.

11. TÓPICO: RELATIVIDADE GERAL

O último tópico está relacionado ao capítulo 10. *Relatividade Geral*. Neste capítulo, apenas fazemos um comentário rápido do que é a teoria da Relatividade Geral, onde temos como principal objetivo o de que o aluno saiba que para referenciais não-inerciais devemos utilizar os conceitos da Relatividade Geral. É importante salientar que esta teoria hoje é a base do conhecimento da cosmologia, com ampla aplicação em questões como o surgimento do Universo.

Assim como no tópico do paradoxo dos gêmeos, achamos importante deixar uma aula inteira reservada para discussões desse tópico, pois em geral os alunos apresentam grande interesse por este assunto.

12. TÓPICO: EXERCÍCIOS

Ao final do desenvolvimento do material com os alunos, algumas aulas devem ser direcionadas para a resolução de exercícios e discussões em geral. Também, se o professor tiver interesse em aplicar uma prova, como uma das formas de avaliação, esta poderá ser incluída nessa etapa.

13. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensino médio vem passando por algumas mudanças. Porém, estas mudanças estão sendo um tanto quanto lentas. É inaceitável que ainda não estejamos ensinando a Física do século XX. Espero, senhor (a) professor (a), que este material lhe seja de grande utilidade no desenvolvimento do ensino de uma Física mais atualizada.

Temos como função formar alunos que possuam ou que tenham condições de dar opiniões sobre os mais diversos assuntos. Citando Pietrocola⁷, *Hoje, ser Alfabetizado Científica e Tecnologicamente*⁸ (ACT) é uma necessidade do cidadão moderno.

Assim, é inexplicável que não sejam mais explorados, ou mesmo introduzidos no ensino médio, conteúdos de Física Moderna. Podemos citar Terrazzan⁹ (1992), que afirma: *A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau*¹⁰.

⁷ PIETROCOLA, Maurício. Ensino de Física – Conteúdo, Metodologia e Epistemologia numa Concepção Integradora. Ed. da UFSC, 2001. 236p.

⁸ Pietrocola utiliza, ao invés da expressão Alfabetização Científica e Tecnológica, a expressão Alfabetização Científica e Técnica.

⁹ TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º Grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis v. 9, n. 3: p. 209-214, dezembro de 1992.

¹⁰ O artigo referido foi publicado em 1992, quando ainda se utilizava a terminologia segundo grau, ao invés de ensino médio.

Cientes da preocupação dos professores em atualizarem-se e procurarem ensinar uma Física mais atual, esperamos que este material seja de grande valia para seu trabalho com nossos alunos do ensino médio.

Obrigado.

Apêndice C

Avaliação: conhecimento histórico e conceitual da Física relativística

Escola: _____

Aluno: _____ **Nº** _____ **Data:** ___/___/___

Analise cada uma das afirmações abaixo e marque apenas uma opção, considerando que [1] significa discordo, [2] significa desconheço e [3] significa concordo.

| | |
|--|-------------|
| 1) Toda teoria científica segue rigidamente um método científico, onde o primeiro passo é a observação. | [1] [2] [3] |
| 2) O pensamento aristotélico começou a ser contestado mais veementemente apenas nos séculos XVI e XVII, e uma de suas características era a de uma Física marcadamente filosófica. | [1] [2] [3] |
| 3) A ordem de sucessão de alguns grandes pensadores da Física foi: primeiro Galileu, em seguida Aristóteles, depois Einstein, depois Newton. | [1] [2] [3] |
| 4) Um cientista desenvolve suas teorias a partir de conhecimentos já existentes. Como exemplo, podemos citar o desenvolvimento da teoria da Relatividade Especial com base, entre outros conceitos, nas equações de Maxwell. | [1] [2] [3] |
| 5) A Física é uma ciência completa, acabada, não havendo mais nada a ser desenvolvido. | [1] [2] [3] |
| 6) Um referencial inercial é um referencial não acelerado. | [1] [2] [3] |
| 7) A velocidade da luz é finita. | [1] [2] [3] |
| 8) Um corpo de massa muito pequena pode atingir velocidades superiores à da luz. | [1] [2] [3] |
| 9) A massa de um corpo aumenta à medida que sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. | [1] [2] [3] |
| 10) Uma das conseqüências da teoria da Relatividade Especial é que os corpos se contraem no sentido do movimento. | [1] [2] [3] |
| 11) Einstein elaborou toda a teoria da Relatividade individualmente, sem a necessidade de possuir conhecimentos relacionados a outros ramos da Física. | [1] [2] [3] |
| 12) A equação $E = m.c^2$, desenvolvida por Albert Einstein, expressa o princípio da equivalência massa-energia. | [1] [2] [3] |

Apêndice D

Prova de Física

Prof. Jeferson Wolff

Nome: _____ N: _____ Data: _____

- 1) O conhecimento científico permaneceu praticamente até o séc. XVI sem ser contestado, prevalecendo principalmente a idéia de um filósofo. Como você caracterizaria essa forma de descrever a Natureza e quem foi esse filósofo?

- 2) Galileu foi quem começou uma nova forma para descrever os fenômenos da Natureza. Dentre as formas de descrição, temos o que chamamos de Relatividade galileana. Quais são as diferenças fundamentais entre a Relatividade galileana e a Relatividade de Einstein?

- 3) Einstein descreveu sua teoria, principalmente para resolver um paradoxo. Em que consistia basicamente este paradoxo?

- 4) Analise a seguinte afirmação: “Einstein, assim como outros cientistas, desenvolveram toda as suas teorias de forma totalmente independente, sem a necessidade de se ter conhecimento de outras teorias já existentes”. Dê sua opinião quanto a esta afirmação.

- 5) Quais são os postulados da Teoria da Relatividade Especial? Quais foram as suas conseqüências?
- 6) Uma das conseqüências diretas da Teoria da Relatividade Especial é a contração do comprimento, na mesma direção do deslocamento. Uma das explicações dadas foi a de FitzGerald, que caracterizava que de fato há uma diminuição do comprimento (material). Mas isto está de acordo com a Teoria da Relatividade Especial? Por quê?
- 7) Muitos livros argumentam que um corpo não pode atingir a velocidade da luz porque sua massa tenderia para o infinito ao se aproximar desta velocidade, ou seja, há um aumento da massa do corpo. Mas, conforme foi visto em aula, a massa é algo característico de um corpo, não muda. Então, como você argumentaria que um corpo não pode atingir a velocidade da luz?
- 8) Uma espaçonave viaja com velocidade de $0,85c$. Supondo que se possa desprezar os tempos de aceleração e desaceleração da nave durante uma jornada de ida e volta que leva 18 anos, medidos por um astronauta a bordo, pode-se afirmar que um observador que permaneceu na Terra terá envelhecido, em anos:

- 9) Uma barra mantém-se paralela ao eixo x de um referencial S , movendo-se ao longo deste eixo com velocidade de $0,80.c$. O seu comprimento de repouso é de $5,0$ m. Qual será seu comprimento em S ?
- 10) Duas espaçonaves movem-se em sentidos opostos com velocidades de $0,6.c$, relativas à Terra. Qual a velocidade de uma das naves relativamente à outra:
- Pela Relatividade de Galileu?
 - Pela Relatividade de Einstein?
 - Por que não podemos utilizar o resultado dado pela Relatividade de Galileu?
- 11) Considere uma massa de 1 kg, que seja totalmente convertida em energia, Quantas residências poderiam ser abastecidas durante um mês, considerando o consumo médio de 300 kWh (quilowatt hora), lembrando que $1\text{kWh}=3,6 \cdot 10^6$ joules?