



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação

Instituto de Biologia

Instituto de Física

Instituto de Química

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE CIÊNCIAS

**A Ênfase no Modelo Ondulatório como Estratégia de
Promoção da Evolução Conceitual em Tópicos
sobre a Luz em Nível Médio**

Jales de Aquino Silva

Brasília – DF

Fevereiro
2009



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação

Instituto de Biologia

Instituto de Física

Instituto de Química

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE CIÊNCIAS

A Ênfase no Modelo Ondulatório como Estratégia de Promoção da Evolução Conceitual em Tópicos sobre a Luz em Nível Médio

Jales de Aquino Silva

Dissertação realizada sob orientação da Prof.^a
Dr.^a Célia Maria Soares Gomes de Sousa e
apresentada à banca examinadora como
requisito parcial à obtenção do Título de Mestre
em Ensino de Ciências – Área de
Concentração “Ensino de Física”, pelo
Programa de Pós-Graduação em Ensino de
Ciências da Universidade de Brasília.

Brasília – DF

Fevereiro
2009

FOLHA DE APROVAÇÃO

Jales de Aquino Silva

A Ênfase no Modelo Ondulatório como Estratégia de Promoção da Evolução Conceitual em Tópicos sobre a Luz em Nível Médio.

Dissertação apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências – Área de Concentração “Ensino de Física”, pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2009.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Célia Maria Soares Gomes de Sousa
(Presidente)

Prof.^a Dr.^a Iramaia Jorge Cabral de Paulo
(Membro externo não vinculado ao Programa – UFMT/MT)

Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima da Silva Lettere Verdeaux
(Membro interno vinculado ao Programa – IF/UnB)

Prof. Dr. Ricardo Gauche
(Suplente – IQ/UnB)

DEDICATÓRIA

À minha adorável esposa, Angelane Aparecida Lopes de Aquino, que sempre me apoiou durante esta jornada de estudo e aprendizagem.

Aos meus queridos filhos, Mateus Lopes Aquino e Cássio Lopes Aquino, que enchem minha vida de alegria e inspiração.

Jales de Aquino Silva

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Professora Doutora Célia Maria Soares Gomes de Sousa, por ter acreditado e confiado no meu projeto para a confecção desta dissertação.

À minha esposa, Angelane Aparecida Lopes de Aquino, querida companheira nos momentos de dificuldades.

Aos colegas professores com quem tenho trabalhado nesses últimos anos no ensino de Física; parte das idéias que motivaram este trabalho surgiu de nossas discussões.

Aos meus alunos que mostravam interesse em aprender Física, mas declaravam ter dificuldades; eles também têm grande responsabilidade pela minha motivação na execução deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências, da Universidade de Brasília, pelo empenho na melhoria do ensino de Ciências.

Aos meus colegas de mestrado, companheiros nas discussões e nos ideais.

Jales de Aquino Silva

RESUMO

A nossa prática no ensino de Física em nível médio tem mostrado que a receptividade dos alunos é maior quando eles entendem melhor o assunto que propomos ensinar a eles; muitos alunos admitem que não gostam de Física porque não a entendem bem. O ensino de Óptica em nível médio geralmente é centrado no modelo de raio de luz, restando pouco ou nenhum tempo para o tratamento de modelos que levem em conta a natureza da luz. Este estudo trata da verificação da viabilidade de se promover estratégias de ensino de tópicos sobre a luz a partir da sua natureza ondulatória, buscando evidências de aprendizagem em um curso de nível médio. Um grupo de alunos foi submetido a situações elaboradas na perspectiva da teoria dos campos conceituais de Vergnaud e da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, com o objetivo de criar condições favoráveis à evolução conceitual e, com isso, dar mais possibilidades para os estudantes entenderem melhor o assunto que nos propomos ensinar. Apesar das condições de infra-estrutura precárias para a realização deste estudo, os resultados nos revelaram evidências de evolução conceitual e a viabilidade de se tratar tópicos sobre a luz a partir da teoria ondulatória.

ABSTRACT

Our Physics teaching practice for high school level has shown us that the receptiveness from the students is stronger when they better understand the subject proposed to be taught; many students admit they do not like Physics because they do not understand it. The Optics teaching in high school is generally centered in the light ray model, with little or no time left for treating the models which consider the nature of the light. This study deals with the verification on the viability of promoting strategies for teaching topics on light from its undulatory nature, in search for evidences of learning in a high school course. A group of students has been submitted to situations elaborated on the perspective of the Vergnaud's Theory of Conceptual Fields and the Theory of Meaningful Learning, by Ausubel, with the objective of creating favorable conditions to conceptual evolution, and, by doing so, giving more possibilities for the students to better understand the subject which is proposed to be taught. Despite the poor infra-structure conditions for the study development, the results have shown evidence of conceptual evolution and the viability of dealing with light-related topics from the undulatory theory.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Onda transversal em uma mola.....	76
Figura 2: Onda longitudinal em uma mola.....	76
Figura 3: Onda com frentes circulares na cuba de ondas	76
Figura 4: Simulação de um padrão de interferência em lâminas para retroprojektor.....	78
Figura 5: Difração em barreira na cuba de ondas.....	79
Figura 6: Difração por fenda na cuba de ondas	79
Figura 7: Difração por uma fenda menor na cuba de ondas.....	79
Figura 8: Difração e interferência por fendas na cuba de ondas	80
Figura 9: Padrão de interferência de um feixe de laser	80
Figura 10: Gráfico comparativo entre as quantidades de respostas no primeiro teste	94
Figura 11: Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no primeiro teste	96
Figura 12: Gráfico comparativo entre os conceitos-em-ação no segundo teste	99
Figura 13: Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no segundo teste.....	100
Figura 14: Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no terceiro teste	103
Figura 15: Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no quarto teste.....	108
Figura 16: Gráfico comparativo entre as médias das notas dos testes.....	110
Figura 17: Gráfico comparativo entre os desvios padrões das notas dos testes	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da turma de trabalho no pré-teste.....	85
Tabela 2: Resultados da turma de trabalho no pós-teste.	87
Tabela 3: Resultados da turma de trabalho no primeiro teste.....	91
Tabela 4: Resultados da turma de trabalho no segundo teste.....	97
Tabela 5: Resultados da turma de trabalho no terceiro teste.	101
Tabela 6: Resultados da turma de trabalho no quarto teste.	105
Tabela 7: Notas atribuídas ao grupo de trabalho nos testes e no pós-teste.....	109
Tabela 8: Notas atribuídas ao grupo de comparação nos testes e no pós-teste.	109

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. Categoria 1 – Concepções de estudantes sobre a luz.....	18
2.2. Categoria 2 – Dificuldades apresentadas por estudantes e professores em Óptica	25
2.3. Categoria 3 – Concepções e dificuldades dos estudantes em tópicos de Óptica e estratégias de ensino	35
2.4. Categoria 4 – Argumentos epistemológicos para o ensino de Óptica	42
2.5. Categoria 5 – Produção de materiais didáticos para o ensino de tópicos de Óptica Física	44
2.6. Conclusões da Revisão da Literatura	46
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	48
4. O PRODUTO EDUCACIONAL	56
4.1. A seqüência da proposta	56
4.1.1. Identificação dos conhecimentos prévios relevantes.....	57
4.1.2. Conceitos iniciais sobre ondas.....	58
4.1.3. Reflexão.....	61
4.1.4. Interferência.....	65
4.1.5. Difração	67
5. METODOLOGIA.....	71
5.1. Sobre os sujeitos e local do desenvolvimento do estudo.....	72
5.2. Sobre o material utilizado.....	73
5.3. Sobre as aulas	74
5.4. Sobre a tomada de dados	81
5.5. Sobre os testes	81
6. ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO.....	83
6.1. Identificação dos conhecimentos prévios relevantes.....	84
6.2. O pré-teste e o pós-teste	85
6.3. Teste 1 – Conceitos iniciais sobre ondas	91
6.4. Teste 2 – Reflexão	96
6.5. Teste 3 – Interferência	101
6.6. Teste 4 – Difração.....	104
6.7. Confrontando o grupo de trabalho e o grupo de comparação.....	108
6.8. As aulas gravadas em áudio.....	111
6.8.1. Aulas sobre os conceitos iniciais sobre ondas.....	111
6.8.2. Aulas sobre os elementos de uma onda periódica transversal.....	114
6.8.3. Aulas sobre a equação fundamental das ondas.....	115
6.8.4. Aulas sobre reflexão de ondas	117
6.8.5. Aulas sobre reflexão de feixes de luz	121
6.8.6. Aulas sobre interferência de ondas	122
6.8.7. Aulas sobre difração	125

7. CONCLUSÕES	131
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
9. APÊNDICES	137
Apêndice A – Pré-teste	137
Apêndice B – Teste 1	138
Apêndice C – Teste 2	139
Apêndice D – Teste 3	140
Apêndice E – Teste 4.....	141
Apêndice F – Pós-teste	142
Apêndice G – Exercícios sobre interferência de ondas	143
Apêndice H – CD Rom (proposta de ação profissional)	144
10. ANEXOS	145
Anexo A – Círculos concêntricos representando frentes de onda circulares	145
Anexo B – Figura de interferência	146

1. INTRODUÇÃO

Durante a minha prática nos últimos anos como docente de Física em nível médio, tenho freqüentemente ouvido as lamentações dos estudantes sobre a dificuldade de entender a Física, o que os leva a criar aversão e falta de interesse por essa disciplina. Nas minhas conversas com esses estudantes, muitos reconheciam a importância dessa disciplina para um melhor entendimento dos fenômenos naturais e que passariam a gostar dela se a entendesse melhor; a receptividade dos alunos é maior quando eles entendem melhor o assunto que se propõe ensinar. Sentir que está aprendendo é um elemento motivador para gostar de uma disciplina; se o estudante sente que está apreendendo ele se motiva a aprender mais.

Vários autores têm defendido a importância da conceitualização para a aprendizagem. Para Heron e Meltzer (2005), no século passado tivemos avanços consideráveis na compreensão de muitos fenômenos físicos, mas ainda temos que entender melhor como o estudante aprende Física, porque estudos revelam uma grande distância entre o que o professor ensina e o que realmente o aluno aprende; e uma das origens disso está justamente na má formação do conceito físico. Para Pietrocola (2005) conhecer a natureza implica a existência de concepções predefinidas. Moreira (2002) afirma que os conceitos são necessários porque o indivíduo tem a necessidade de derivar ações das representações do mundo e de ter concepções verdadeiras (ou pelo menos adequadas) do mundo. McDermott (2000) enfatiza a boa compreensão qualitativa dos conceitos físicos para se estabelecer bases mais firmes para se resolver problemas quantitativos e desenvolver habilidades de raciocínio. Com isso, pretendo nesse estudo desenvolver um trabalho que colabore para o entendimento de como se dá a aprendizagem de alguns conceitos físicos, identificar dificuldades e delinear estratégias que possam ser efetivas para a aprendizagem desses conceitos.

Tenho percebido que quando trabalhamos Óptica no Ensino Médio damos muita atenção ao modelo de raio de luz, gastando boa parte do tempo traçando segmentos de retas para explicarmos a formação de imagens por reflexão e por refração. Ficamos muito tempo trabalhando a Óptica Geométrica restando pouco ou nenhum tempo para a Óptica Ondulatória. Para Gircoreano e Pacca (2001) essa maneira usual de estudar Óptica não deixa evidente que a luz se propaga num espaço tridimensional, que há uma fonte de luz e que existem obstáculos para a propagação; os aspectos concernentes à natureza da luz são, em geral, desconsiderados. Para Paulo et al (1997) deve-se dar menor ênfase ao ensino de Óptica Geométrica no Ensino Médio, em favor de uma maior ênfase à discussão sobre a natureza da luz, por ser mais importante para a formação profissional, científica e cultural do indivíduo entender a natureza da luz do que lidar com lentes e prismas.

Essas considerações me puseram a elaborar as seguintes questões: como eu poderia entender melhor os processos pelos quais o sujeito aprende, e com isso ajudar os alunos a entenderem melhor os conceitos físicos que tento ensinar a eles? O ensino de Óptica, baseados em aspectos relacionados à natureza da luz, favoreceria a aprendizagem desse conteúdo em nível médio?

Essas questões me levaram a tomar como base teórica deste estudo, a teoria dos campos conceituais de Vergnaud. Segundo Moreira (2002) ela está sendo utilizada no estudo sobre aprendizagem dos conceitos físicos e tem se mostrado útil na melhoria da aprendizagem, na identificação de dificuldades de aprendizagem de conceitos físicos e na seleção de situações instrucionais que possam ajudar na progressiva superação dessas dificuldades. Quanto à importância do conhecimento prévio para a elaboração das situações que trabalhamos com os estudantes neste estudo, recorreremos às idéias de Ausubel sobre a aprendizagem significativa. Com isso, acreditamos que essas duas teorias nos fornecem elementos suficientes para

entendermos melhor como se dá o processo de aprendizagem e para elaboração de situações instrucionais mais favoráveis.

A partir desses questionamentos e dos referenciais teóricos escolhidos, nosso estudo focou a verificação da viabilidade de se construir estratégias de ensino de tópicos sobre a luz a partir da sua natureza ondulatória, buscando evidências de aprendizagem de alunos em um curso de nível médio. Esse estudo foi desenvolvido em uma escola da rede pública de ensino do Distrito Federal durante o primeiro semestre de 2008, com alunos da disciplina Física 2 da Educação de Jovens e Adultos, 3º segmento (equivalente ao Ensino Médio do curso regular).

Segundo Vergnaud, o ensino deve facilitar a construção de conhecimentos explícitos e cientificamente aceitos, a partir do conhecimento implícito; se o aprendiz consegue incorporar na sua estrutura cognitiva conhecimentos cientificamente aceitos, dizemos que houve evolução conceitual. O momento ideal para se promover evolução conceitual é aquele no qual o sujeito se confronta com situações, porque os conceitos só se tornam significativos através delas; para Vergnaud, uma situação é entendida como uma tarefa a ser cumprida. Segundo Sousa e Fávero (2002), a teoria dos campos conceituais parte do princípio que a obtenção do conhecimento está determinada pelas situações abordadas pelo sujeito e pelas ações que ele executa durante sua resolução. Ao longo do nosso trabalho, propusemos aos alunos situações elaboradas com o objetivo de fazer com que eles explicitassem seus conhecimentos (o que Vergnaud chama de conhecimentos-em-ação) ao tentar resolvê-las e, a partir disso, promover evolução conceitual. Tendo esse objetivo como norteador do nosso estudo, desenvolvemos o trabalho através das seguintes etapas:

Revisão da Literatura – Realizamos uma revisão bibliográfica com o objetivo de identificar investigações sobre o ensino de Óptica Física e sobre as concepções e evolução conceitual de estudantes em tópicos relacionados ao ensino de Óptica, no período de 1995 a 2006, nos seguintes periódicos: Caderno Brasileiro de Ensino de Física (antigo Caderno

Catarinense de Ensino de Física), *Investigações em Ensino de Ciências*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, *Enseñanza de las Ciencias*, *American Journal of Physics*, *International Journal of Science Education*, *Journal of Research in Science Teaching*, *Research in Science Education*, *Science Education e Science & Education*. Seleccionamos um artigo das Atas do I Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências e duas dissertações de mestrado.

Referencial teórico – A base teórica de nosso estudo é a teoria dos campos conceituais de Vergnaud, que forneceu as diretrizes para elaborarmos as situações propostas aos estudantes, com o intuito de provocar neles evolução conceitual em tópicos sobre a luz, a partir da teoria ondulatória. Quanto à importância do conhecimento prévio para a elaboração das situações, recorreremos à teoria da aprendizagem significativa de Ausubel para melhor fundamentar nossa ação.

O produto educacional – Construimos um manual de apoio ao professor, no qual descrevemos a seqüência de situações, conforme a teoria dos campos conceituais, produzidas para verificarmos a viabilidade de se introduzir tópicos sobre a luz a partir da teoria ondulatória e para criarmos condições favoráveis para o aluno evoluir conceitualmente.

Metodologia – Durante o primeiro semestre de 2008 um grupo de alunos foi submetido a um tratamento no qual se tentou promover a evolução conceitual de tópicos de Óptica a partir da teoria ondulatória. Na perspectiva da teoria dos campos conceituais de Vergnaud, esse tratamento consistia em propor situações do tipo tarefas a realizar, a partir das quais coletamos dados sobre procedimentos e outras maneiras através das quais os estudantes expressavam seu raciocínio.

Resultados e análise dos dados – Os resultados foram obtidos a partir de um pré-teste, um pós-teste e mais quatro testes avaliativos. Além disso, para termos dados sobre as aulas nas quais trabalhávamos as situações, elas foram gravadas em áudio. Queríamos, com isso,

verificar se os estudantes alcançavam conhecimentos cientificamente aceitos e como ocorria esse processo.

Discussão – Ao longo da exposição dos resultados e análise de dados, comentários dos resultados obtidos são feitos. Percebemos algumas evidências de evolução conceitual no grupo analisado.

Conclusões – É apresentada as considerações finais relativas aos objetivos e resultados deste estudo, as dificuldades para sua implementação e perspectivas futuras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Com o intuito de identificar investigações existentes sobre o ensino de Óptica Física e sobre as concepções e evolução conceitual dos estudantes em tópicos relacionados ao ensino da Óptica, áreas de interesse deste trabalho, na revisão da literatura foram selecionados quinze artigos e duas dissertações, publicados no período compreendido entre 1995 e 2006. Foram consultados os seguintes periódicos: Caderno Brasileiro de Ensino de Física (antigo Caderno Catarinense de Ensino de Física), Investigações em Ensino de Ciências, Revista Brasileira de Ensino de Física, Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, Enseñanza de las Ciencias, American Journal of Physics, International Journal of Science Education, Journal of Research in Science Teaching, Research in Science Education, Science Education e Science & Education. Um artigo foi selecionado das Atas do I Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (1997) e as dissertações foram defendidas em São Paulo na Universidade de São Paulo e em Porto Alegre na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dessas publicações, apresentaremos um resumo das principais contribuições ao nosso tema, organizando-as em categorias. Como critério de categorização, focamos nos objetivos principais de cada trabalho, o que nos permitiu estabelecer cinco categorias, a saber: 1) concepções de estudantes sobre a luz; 2) dificuldades apresentadas por estudantes e professores em Óptica; 3) concepções e dificuldades dos estudantes em tópicos de Óptica e estratégias de ensino; 4) argumentos epistemológicos para o ensino de Óptica; 5) produção de material didático para o ensino de tópicos de Óptica Física.

2.1. Categoria 1 – Concepções de estudantes sobre a luz

Esta categoria refere-se às investigações sobre concepções de estudantes sobre a luz, antes e/ou após eles terem sido submetidos a alguma estratégia de ensino envolvendo tópicos de Óptica.

Hubber (2006) investigou sobre as concepções de seis estudantes australianos, com idade de doze anos, sobre a natureza da luz antes e após uma seqüência de ensino centrada na Óptica Física e em idéias sobre a Mecânica Quântica. Os dados foram coletados por meio de três entrevistas semi-estruturadas e dois questionários. Duas entrevistas ocorreram antes da seqüência de ensino e a terceira após essa seqüência. Um questionário foi administrado antes e outro durante essa seqüência. A primeira entrevista, administrada 19 semanas antes da seqüência de ensino, explorou as concepções sobre a natureza da luz que os estudantes já possuíam; essa entrevista revelou três concepções:

1. A luz viaja como se fossem ondas na água; raios são linhas orientadas que indicam a direção e sentido de propagação das ondas.
2. A luz é constituída de raios.
3. A luz é constituída de partículas; os raios de luz são compostos de fluxo de partículas.

A entrevista revelou que três estudantes acreditavam realmente que a luz era constituída de raios. Os outros três entendiam que o modelo de raio era só uma representação para compreendermos o comportamento da luz, e interpretavam a luz como ondas sendo que, dentre esses, dois também apresentaram o modelo corpuscular. Com base nesses resultados, o primeiro questionário foi administrado 7 semanas antes da seqüência de ensino, onde se explorava a razão da escolha do modelo apropriado pelo estudante para diferentes fenômenos luminosos. A segunda entrevista foi conduzida uma semana antes da seqüência de ensino e,

uma vez mais, explorou as concepções que os alunos tinham sobre luz, particularmente após suas experiências com o modelo de onda sonora administrada antes dessa seqüência. Essa entrevista mostrou que os estudantes mantiveram os mesmos modelos evidenciados na primeira entrevista. O segundo questionário foi administrado durante o período de ensino e incluiu questões relativas às concepções dos estudantes sobre a natureza da luz. A terceira entrevista foi conduzida 4 semanas após a seqüência de ensino, quando se explorou as concepções construídas pelos estudantes.

Ao final desse estudo, cinco estudantes construíram modelos híbridos que continham aspectos corpusculares e ondulatórios e apenas um estudante percebeu que raios de luz, ondas de luz e fótons não são na verdade constituintes da luz, mas sim representações da luz. A predominância de modelos híbridos gera dificuldade na compreensão dos modelos científicos, pois faz o estudante acreditar que esses modelos são representações fiéis da realidade, quando são apenas construções da mente humana para interpretar a natureza. Para o autor, não devemos apenas fazer com que os estudantes entendam os modelos científicos sobre a luz, mas também a natureza e a função desses modelos.

Galili e Lavrik (1998) investigaram as concepções de 72 estudantes de cinco escolas de Ensino Médio em Jerusalém, sobre o conceito de fluxo de luz, após terem tido um curso de Óptica. Pouquíssimos estudantes deram respostas cientificamente corretas e as respostas evidenciaram que poucos compreendem a luz como o fluxo no espaço, de uma entidade física. Inspeccionando materiais instrucionais dos Estados Unidos e de Israel e analisando vários trabalhos que documentam as concepções prévias dos estudantes sobre Óptica, os autores apontaram as seguintes causas para o baixo desempenho no teste:

- A Óptica introdutória é preferencialmente apresentada em termos de raios de luz.
- A noção de fluxo de luz tem sido removida dos currículos.
- Compreensão inadequada do papel dos raios de luz como um modelo alternativo.

- A não percepção da relação entre luz e energia.

A omissão do conceito de fluxo de luz nos currículo de Óptica tem reforçado nos estudantes concepções prévias cientificamente incorretas. Embora a visualização de raios comumente apresente uma vantagem —“tornando o invisível visível!” esse aspecto pode, ao mesmo tempo, aumentar esquemas errôneos sobre a natureza dos raios. A visualização de fluxo de luz, por exemplo, em computadores, poderia aumentar a consciência da condição instrumental do raio de luz e, naturalmente, introduzir fluxo como uma característica superior (GALILI e LAVRIK, 1998).

O estudo de Langley et al (1997), realizado em escolas de Israel, trouxe à tona concepções e representações sobre a propagação da luz e formação de imagens em estudantes com idades entre 14 e 15 anos que estavam no início de um curso sobre Óptica Geométrica. Foi administrado um questionário com nove questões a 139 estudantes em cinco escolas. As questões tratavam de situações comuns envolvendo luz e visão, com muitos itens que solicitavam aos estudantes apresentar um diagrama que descrevesse e explicasse a situação proposta. A partir dos resultados coletados, os autores concluíram que os estudantes em geral:

- Mostraram alguma familiaridade com fontes de luz, objetos opacos, espelhos planos e lentes;
- Consideravam a luz como um ente espacial que se espalha a partir de uma fonte e que interage com objetos no seu caminho;
- Mostraram algumas noções cientificamente corretas sobre propagação retilínea, objetos opacos bloqueando a luz, reflexão em espelhos planos e refração em lentes.

Porém, os resultados mostraram algumas inconsistências:

- A luz era algumas vezes esquematizada como algo contornando a sua fonte, e algumas vezes como algo partindo da sua fonte;
- O sentido de propagação da luz era raramente representado;

- Enquanto muitos estudantes mostravam familiaridade com algumas situações (por exemplo, formação de sombras e formação de imagens em espelhos planos), eles raramente as interpretava totalmente em termos da propagação da luz;
- A presença de um observador esquematizado em algumas questões prejudicava a explicação de muitos estudantes.

Langley et al (1997) destacam que houve acordos e desacordos entre as idéias pré-instrucionais dos estudantes e aquelas cientificamente aceitas. Como os conhecimentos com os quais os estudantes chegam para o início de uma instrução foram construídos no dia-a-dia e justificados pela utilidade, e como não se tem o tempo igual à idade deles para se reestruturar o conhecimento prévio, os autores sugerem o uso de meios que eles chamam de sofisticados e efetivos para se superar as inconsistências apresentadas. Propõem uma seqüência de ensino em três etapas:

- 1. Experiências objetivando a percepção visual:** explicar o papel do olho desde o início como um componente de um sistema óptico; fazer com que os estudantes associem visão com luz incidente em seus próprios olhos, por meio de experiências ópticas que combinem uma sensação nítida de luz incidente com uma clara percepção de visão; fazer com que os estudantes aceitem o sentido de propagação da luz projetando feixes de laser ou feixes estreitos de luz branca; promover melhorias na capacidade de representação gráfica com trabalhos em grupos num laboratório.
- 2. Discussões em grupo:** organizar discussões em grupo para que os estudantes exponham suas idéias e compartilhem com seus pares.
- 3. Uso de simulações em computador:** programas de computador que simulem traçados de raios de luz podem facilitar o entendimento de fenômenos relacionados com a Óptica Geométrica e motivar o estudante.

Paulo et al (1997) apresentam um estudo sobre a origem e desenvolvimento de concepções sobre a natureza da luz entre estudantes de uma escola de Cuiabá. Um questionário sobre a natureza da luz foi aplicado a 88 estudantes que estavam no final do Ensino Fundamental (antes de terem contato formal com a Óptica Geométrica) e a 114 alunos que estavam no final do Ensino Médio (após terem contato com formal com a Óptica Geométrica). A tabulação das respostas mostrou que os estudantes acreditam que a luz é constituída por energia, raios, partículas e ondas.

Constatou-se que a concepção predominante dos alunos do final do Ensino Fundamental é a de que a luz é constituída por energia, e dos alunos do final do Ensino Médio é a de que a luz é constituída por raios.

Também investigaram a concepção de luz das crianças, na Educação Infantil. Foi proposto a 162 crianças que fizessem um desenho no qual aparecesse o Sol, e elas estavam livres para apenas desenhar, ou ainda, comentar. Em geral elas desenharam o Sol como uma bola cercada por raios, ou seja, conceberam a luz como raios.

Para Paulo et al (1997) há uma forte indicação de que o ensino de Óptica Geométrica no nível médio reforça a concepção de que a luz é constituída de raios, podendo até inibir a utilização de outras concepções sobre a luz. Eles acham pouco provável que a origem da concepção de raios ocorra durante a escolarização, tendo em vista os resultados apresentados pelas crianças: a idéia do Sol como sendo uma bola amarela que emite raios em todas as direções é uma imagem de caráter universal e tem persistido ao longo do desenvolvimento da humanidade. Acreditam ainda que a concepção da luz como raios possui grande estabilidade na estrutura cognitiva humana. Para eles, a maioria dos estudantes do final do Ensino Fundamental acredita que a luz é constituída por energia devido ao ensino escolar formal, já que o conceito de energia é bastante enfatizado na segunda metade do Ensino Fundamental.

Os autores, ao final, indicam que esses resultados apresentados pelos estudantes do Ensino Médio é consequência da pouca ênfase dada às discussões sobre a natureza da luz, em especial sobre o seu aspecto ondulatório, e concluem:

- Qualquer estratégia de ensino/aprendizagem elaborada a fim de promover uma mudança conceitual em direção às concepções científicas da Física Moderna deve ter como ponto de partida o reforço das propriedades ondulatórias da luz e o estudo mais aprofundado de fenômenos tais como a difração e a interferência.
- A discussão sobre a natureza da luz deve ser feita antes do estudo da Óptica Geométrica.
- A análise de situações onde a luz apresenta uma natureza de partícula (refração e reflexão) e de onda (difração e interferência) seja feita de maneira menos separada.
- Deve-se dar menor ênfase ao ensino de Óptica Geométrica no Ensino Médio, em favor de uma maior ênfase à discussão sobre a natureza da luz, por ser mais importante para a formação profissional, científica e cultural do indivíduo entender a natureza da luz do que saber lidar com lentes e prismas.

Pesa et al (1995) identificam e analisam algumas idéias e tipos de raciocínios associados à natureza e propagação da luz em oito estudantes de cursos de licenciatura e bacharelado em Física, antes de iniciarem os trabalhos práticos de Óptica em um curso de laboratório. Solicitou-se a esses alunos que respondessem a um questionário. A partir das respostas, identificaram-se as seguintes concepções centrais sobre luz:

- É possível enxergar um feixe de luz emitido, por exemplo, por uma lanterna, independente de que exista ou não partículas em suspensão no ambiente.
- Só a posição olho determina a visão, sem considerar que é fundamental que chegue luz ao mesmo.
- A luz se propaga não apenas de forma retilínea.
- A luz sofre reflexão apenas de forma especular.

- De cada ponto de uma fonte de luz é emitido apenas um raio de luz.

Os argumentos associados a essas concepções são característicos do senso comum e fortalecidos pela linguagem cotidiana. Ao invés de se falar radiação luminosa, fala-se da luz como se fosse uma entidade particular e não como um fluxo que se emite, se propaga e interage com a matéria. Se essa perspectiva não é posta em conflito e reelaborada, é origem de erros conceituais na compreensão e conceitualização da formação de imagens com lentes, espelhos, orifícios ou prismas. Por outro lado, na linguagem diária não temos, em geral, necessidade de questionarmos a respeito da luz como entidade física que viaja desde o objeto luminoso ou iluminado ao olho. Porém, quando se fala da luz em sala de aula, o contexto é diferente e se o estudante não é advertido, acaba trasladando para a aula suas noções geradas em um contexto totalmente diferente, que é o da vida diária (PESA et al, 1995).

Parece fundamental então, delimitar e discriminar os contextos através de situações de aprendizagem que provoquem no estudante uma atitude de questionamento do paradigma intuitivo. Essas situações devem levar em conta dois aspectos: em primeiro lugar, construir o conceito de luz como entidade física que se propaga no espaço, que é invisível e incolor e que interage com a matéria; em segundo lugar, abstrair das pré-concepções e sensações, as conceitualizações científicas da Física (*op. cit.*).

Podemos concluir a partir desses artigos que a forma como a Óptica Geométrica tem sido ensinada nas instituições de ensino tem dificultado a aquisição, pelo estudante, de outros modelos sobre a luz, como o modelo de fluxo, o modelo ondulatório e o modelo corpuscular. Se não é deixado claro ao estudante que representações traçadas de raios no papel ou no quadro negro são simplesmente modelos e não a representação fiel da realidade, ele acaba encontrando dificuldades na aprendizagem de outras formas de compreender a luz. Com isso, é importante que o professor leve em conta, nas suas estratégias instrucionais, a discussão do papel do modelo científico.

A nossa prática no Ensino Médio tem revelado que os professores dão ênfase ao ensino de Óptica Geométrica, sobrando pouco ou nenhum tempo para a discussão de outros modelos sobre a luz. Os autores que se enquadram nessa categoria revelaram a importância de procurarmos formas mais dinâmicas de explorarmos os fenômenos luminosos com os nossos estudantes, até tentando tratar, desde o início, o modelo ondulatório da luz e os fenômenos de interferência e difração. Isso vem de encontro ao nosso trabalho; pretendemos justamente verificar se seria viável começar um curso de Óptica com a teoria ondulatória.

2.2. Categoria 2 – Dificuldades apresentadas por estudantes e professores em Óptica

Nesta categoria estão artigos que evidenciam dificuldades apresentadas por estudantes e professores quando expostos a situações instrucionais pertinentes à Óptica. Muitas dessas dificuldades passam despercebidas no dia-a-dia na sala de aula e os autores nos alertam para darmos atenção a elas quando elaboramos nossas estratégias instrucionais.

Colin et al (2002) enfocam dificuldades que estudantes apresentam ao interpretar figuras em livros didáticos no domínio da Óptica. Após uma investigação das dificuldades dos estudantes, a pesquisa enfoca o ponto de vista de professores e suas sugestões. Com isso, esses autores selecionaram cinco figuras de livros didáticos que foram apresentadas a estudantes e constataram, com frequência, as seguintes dificuldades:

1. Ao analisarem uma figura que esquematizava a reflexão difusa de raios de luz, muitos estudantes não levavam em conta que raios são elementos de um modelo; acreditavam que são elementos comuns e perfeitamente visíveis.

2. Ao analisarem uma figura que esquematizava uma lente delgada com comportamento convergente, conjugando uma imagem real e ampliada sobre um anteparo, com três raios de luz partindo do objeto (um de cada extremo do objeto, e um do seu meio), passando pelo centro óptico da lente e chegando aos respectivos pontos imagens, muitos estudantes acharam que a esquematização de uma imagem pode ser sempre feita dessa maneira; não levaram em conta a possibilidade de utilização de outros raios. Muitos também acharam que se o anteparo fosse afastado da lente, uma imagem nítida ainda se formaria sobre ele. Enfim, percebeu-se que os estudantes atribuíram características inapropriadas à imagem devido a posição dos raios no esquema, provocando obstáculos na interpretação dessa figura.
3. A terceira figura esquematizava dois raios de luz monocromática partindo de uma fonte puntiforme. Cada um atingia uma fenda diferente, e depois eram desviados devido à difração e se encontravam em um anteparo. A idéia era representar o princípio da interferência evidenciado na experiência de Young. Os estudantes evidenciaram as seguintes dificuldades na interpretação dessa figura: não consideravam a possibilidade de outros caminhos para os raios que emergem das fendas; consideravam que os raios da luz refratada era apenas uma continuação dos raios incidentes nas fendas. Mais uma vez, os próprios elementos da figura provocaram obstáculos para a sua devida interpretação.
4. A quarta figura apresentada mostrava uma seta indicando um raio solar chegando a Júpiter, e outra seta indicando a direção e sentido de visão de um observador na Terra olhando para Júpiter. Os estudantes demonstraram dificuldades de interpretar as situações dessa figura, provavelmente devido à similaridade de representação para situações diferentes.
5. Na quinta figura, tem-se um esquema da superposição de três cores primárias e, em seguida, um esquema da superposição de três cores complementares às primárias. Não

fica clara se a mistura é feita com luzes ou com tintas e os estudantes evidenciaram essa confusão.

As cinco figuras apresentadas aos alunos foram também apresentadas a alguns professores e, para cada figura, foi pedido a eles que respondessem a um questionário com as mesmas perguntas sobre as dificuldades esperadas pelos estudantes. Para outros professores foi apresentado um segundo questionário e, desta vez, as mesmas cinco figuras foram acompanhadas com alguns comentários típicos dos estudantes que explicitaram suas dificuldades em interpretar essas imagens. As questões desse último questionário versavam sobre como os professores interpretavam esses comentários e o que eles sugeriam em cada caso para aperfeiçoar a interpretação. Os autores resumiram os principais resultados dos professores:

1. Para a primeira figura, poucos professores mencionaram a confusão dos alunos entre uma situação realista e uma simbólica; os professores, no melhor dos casos, limitam-se a reconhecer o mal entendido dos alunos, sem nenhum comentário sobre sua origem; os professores investigados, em grande parte, não estão inteirados da ambigüidade entre objetos do mundo real versus esquemas ou entidades simbólicas, que podem promover obstáculos ao entendimento.
2. Para a segunda figura, poucos professores perceberam que a maneira como os raios estavam dispostos constituíam em obstáculo para a interpretação correta dessa imagem (como foram dispostos, esses raios não implicam necessariamente que a imagem real será formada na distância que ele está no esquema); na parte em que os professores interpretavam os comentários dos alunos, poucos indicaram que a disposição dos raios interferiria na interpretação correta da situação.
3. Para a terceira figura, quando perguntados sobre as dificuldades esperadas sobre essa figura, somente um professor evidenciou o fato de que dois raios particulares tinham sido

selecionados e que esses raios correspondem a um ponto particular de chegada no anteparo e que na verdade as fontes secundárias (orifícios) difratam em toda a metade à direita dos orifícios. Ou seja, as maneiras como os raios estão dispostos constituem obstáculo para a interpretação correta dessa imagem. Na confrontação com comentários de estudantes, três quartos dos professores criticaram a disposição dos raios. Porém, nenhum professor evidenciou que os raios à esquerda e à direita dos orifícios têm significados diferentes.

4. Para a quarta figura, na primeira investigação, nenhum professor notou que a similaridade na representação da direção e sentido da luz vinda do Sol para Júpiter, com a representação da direção e sentido de observação de alguém olhando para Júpiter era fundamental para a interpretação dessa imagem. Na confrontação com comentários de estudantes, um terço dos professores percebeu alguma similaridade nessas representações. No geral, percebe-se que os professores investigados não são muito vigilantes sobre a similaridade dos símbolos nas imagens, e isso pode acarretar obstáculos para a interpretação.
5. Para a quinta figura, na primeira investigação, poucos professores perceberam os problemas ali presentes. Com relação aos comentários dos alunos, por volta da metade dos professores consideraram os comentários incompletos ou ambíguos, mas não totalmente falsos.

Colin et al (2002) concluem que as figuras selecionadas nesse estudo fizeram com que os alunos cometessem vários equívocos e os professores investigados mostraram dificuldades em perceber os obstáculos que essas figuras apresentavam para a sua interpretação. Quando comentavam as dificuldades apresentadas pelos estudantes, os professores deram preferência por enfatizar o que poderia ser adicionado para ilustrar devidamente o fenômeno.

Os autores sugerem serem cruciais no processo ensino–aprendizagem, os seguintes pontos: como uma dada mensagem supostamente transmitida por uma imagem pode ser interpretada pelo leitor, e como levar isso em consideração ao executar uma seqüência de ensino. Avaliam que resultados como o desta pesquisa, e de outras similares, poderiam orientar a formação de professores, no intuito de deixá-los mais sensíveis às dificuldades de interpretação de figuras. Além disso, segundo eles, ao se tentar executar seqüências inovadoras de ensino, pode-se usar esse tipo de informação para aperfeiçoar o material, evitando reforçar as dificuldades apresentadas com a excessiva ambigüidade de símbolos ou com a má posição das estruturas gráficas e usando cuidadosamente as legendas com um meio para clarificar a mensagem.

Colin e Viennot (2001) identificaram algumas dificuldades evidenciadas por estudantes universitários em situações envolvendo Óptica Geométrica e Óptica Física. Na investigação, conduzida com estudantes universitários de Física do terceiro ano, eram dispostas figuras com os seguintes elementos em cada situação: um objeto iluminado, uma lente e um anteparo sobre o qual uma configuração era apresentada. Foram propostos três problemas.

No primeiro problema, uma onda luminosa plana é difratada por três fendas e a configuração de difração é observada sobre um anteparo localizado sobre o plano focal de uma lente. Aos estudantes foi solicitado:

- Na questão 1: desenhe os caminhos da luz vindo das fendas e que alcançam um ponto M sobre o anteparo; explique suas respostas e mencione o fenômeno que ocorreu com a luz ao seguirem esses caminhos.
- Na questão 2: calcule o campo de amplitude em M e justifique seus cálculos.

Pelo fato de três ondas esféricas coerentes se superporem no anteparo, essa situação não pode ser analisada apenas com a Óptica Geométrica. Contudo, o caminho de cada onda separada que alcança o anteparo é baseado em regras geométricas.

Na questão 1, metade dos estudantes, de um total de 205, apresentaram desenhos e justificativas corretos. Para surpresa dos autores, apenas 57% mencionaram abertamente a difração.

Na questão 2, o cálculo correto do campo de amplitude no ponto do anteparo foi freqüente (80%), mas a maioria dos estudantes não justificou o cálculo da diferença de fase.

No segundo problema, um *slide* é iluminado por uma onda luminosa plana e sua imagem conjugada por uma lente é observada sobre um anteparo. Aos estudantes é solicitado que desenhem pelo menos três raios vindos do *slide* e que convergem para um ponto P no anteparo que está fora do eixo principal da lente. Uma resposta aceita, de acordo com a Óptica Geométrica, é a de que a imagem é ponto-a-ponto réplica do objeto e que todos os raios que divergem de um ponto do *slide*, após atravessarem a lente, convergem para o ponto imagem. Houve apenas 27% de respostas corretas e 54% não respeitaram a correspondência ponto-a-ponto entre um objeto e sua imagem. Parece que, mais uma vez, os estudantes não percebem o significado dos seus diagramas.

No terceiro problema o experimento de Young é apresentado: uma onda luminosa é difratada por duas fendas e suas franjas de interferência são alargadas por uma lente convergente para uma melhor observação em um anteparo. É formulada a seguinte questão: observam-se franjas sobre o anteparo; essas franjas são as imagens de algo produzido pela lente? Se sim, qual é o correspondente objeto? Explique sua resposta. Se não, o que é observado no anteparo? Explique sua resposta. Tanto o modelo de raio da Óptica Geométrica quanto o modelo ondulatório são necessários para interpretar essa situação. Nenhuma resposta completa envolvendo os dois modelos foi elaborada pelos estudantes: 24% usaram ambos os modelos; 46% usaram apenas um modelo, sendo que desses, 18% usaram o modelo geométrico e 28% usaram o modelo ondulatório. Houve 6% de respostas não relevantes e 24% não responderam ou não justificaram.

Mesmo em situações clássicas com questões tradicionais, muitos estudantes não dominavam bem os modelos da Óptica Geométrica e da Óptica Ondulatória. Segundo os autores, essas dificuldades parecem estar relacionadas com a má interpretação dos desenhos classicamente usados em Óptica e podem estar ligadas com a falta de consciência sobre o significado do que os raios de luz representam. Todas essas dificuldades estão fortemente ligadas com as interpretações de diagramas. Os modelos usados na Óptica são freqüentemente baseados em diagramas, que se não são bem dominados, provocam dificuldades na interpretação desses modelos.

Os resultados dessa investigação levam a reconsiderar o ensino de Óptica no fim do Ensino Médio e em cursos universitários, antes da Óptica de Fourier. A principal noção a ser adquirida nesses níveis é a da “seleção reversa” dos caminhos da luz. A “seleção” é salientada porque estudantes freqüentemente esquecem que há uma infinidade de caminhos para a luz após a difração, e os caminhos devem ser selecionados para se interpretar o que é observado no anteparo. A seleção depende da localização do ponto escolhido no anteparo e da própria localização do anteparo. Tendo determinado o ponto de chegada, é necessário observar “o caminho reverso” para se saber quais caminhos selecionar e como essa seleção funciona. Essa noção de seleção reversa não é usada em livros didáticos. Primeiramente apresenta-se Óptica Geométrica e formação de imagens; então, o modelo ondulatório é usado para interpretar interferência e difração. Normalmente estudantes devem esperar até o estudo da Óptica de Fourier para entender que uma lente pode fornecer uma configuração de difração ou uma imagem para um dado objeto, dependendo da localização do anteparo. Sugere-se, então, introduzir a noção da seleção reversa bem cedo, mesmo que seja feito apenas em Óptica Geométrica. A seleção de caminhos da luz e o agrupamento de raios podem reduzir o risco dos estudantes raciocinarem apenas com um raio isolado, como normalmente eles fazem (COLIN E VIENOT, 2001).

Cudmani e Pesa (1999) analisaram resultados obtidos em uma oficina de formação e atualização de professores universitários, cujo objetivo era o de transferir resultados de uma investigação educativa em estratégias de aprendizagem em Óptica Física e em particular dos fenômenos da polarização da luz. Foram detectados fortes obstáculos que dificultam a compreensão dos fenômenos estudados. Esses obstáculos pareceram estar relacionados fundamentalmente com uma construção incorreta das concepções básicas sobre ondas em geral, e sobre ondas eletromagnéticas em particular. Esses obstáculos têm origem em pré-concepções não científicas, que foram detectadas em estudantes, mas que neste trabalho se mostraram muito evidentes em professores universitários. Esses professores responderam a um questionário pré-instrucional e uma avaliação final. As pré-concepções não científicas detectadas foram:

- Confusão e inversão da relação entre realidade e modelo: isso foi evidenciado quando se tentou justificar a transversalidade da onda luminosa por ela se adaptar ao modelo eletromagnético; por essa concepção é a realidade que se deve adequar ao modelo quando deveria ser o contrário.
- Uso de um modelo muito simplificado de onda (a onda infinita de amplitude e frequência constantes); o uso desse modelo na instrução pode ser a causa do não aparecimento de idéias como coerência, direção de vibração de campo eletromagnético, colimação, as quais são idéias essenciais para uma correta compreensão dos fenômenos de polarização luminosa.
- Raciocínio mono conceitual: algumas explicações se centraram somente em uma das variáveis características para interpretar algumas situações mais complexas.
- Raciocínio antropocêntrico: caracterizado pela compreensão centrada quase exclusivamente no observável.

- Raciocínio puramente algorítmico: evidenciado quando em algumas respostas se empregou formalismos matemáticos e outros símbolos representacionais despojados de significado físico.

É necessário, por parte dos docentes participantes, reconstruírem conceitos e simultaneamente adquirir competências em modos mais científicos de raciocinar. Constatou-se, com essa oficina, que existem obstáculos para a compreensão dos fenômenos com luz polarizada, que não são superados facilmente, mesmo com situações de aprendizagem cuidadosamente preparadas. Esses obstáculos parecem estar vinculados em primeiro lugar a um modelo de onda eletromagnética muito simplificada (a onda infinita, de amplitude e frequência constantes) e à persistência de modos pré-científicos de raciocinar. A tomada de consciência, por parte dos professores participantes, das suas dificuldades, constitui aspecto determinante para uma reflexão crítica e uma melhor compreensão das dificuldades dos próprios alunos (CUDMANI e PESA, 1999).

A investigação conduzida por Ambrose et al (1999) indicou que estudantes que participaram de cursos introdutórios (cálculo ou álgebra) e estudantes que participaram de curso mais avançados (Física Moderna ou introdução à Mecânica Quântica) na Universidade de Washington e de outras universidades dos Estados Unidos, freqüentemente não conseguem descrever o padrão produzido em um anteparo quando luz é incidida em uma fenda simples ou dupla. Para esses autores, é necessário ter consciência das falhas na estrutura conceitual dos estudantes no campo da Óptica para promovermos a aprendizagem sobre a natureza e o comportamento da luz.

Os dados foram extraídos de entrevistas gravadas e respostas a um questionário. Os resultados foram organizados em três categorias:

- 1. Aplicação errônea da Óptica Geométrica e da Óptica Física:** muitos estudantes falharam ao considerar se a Óptica Geométrica ou a Óptica Física era válida em cada

situação. Eles tentavam aplicar um modelo quando o outro era apropriado ou combinavam idéias de ambos, formando um modelo híbrido.

- 2. Falta de uma compreensão qualitativa do modelo ondulatório da luz:** mesmo quando os estudantes reconheciam que o modelo ondulatório da luz era apropriado, muitos não conseguiam aplicá-lo para explicar fenômenos de difração e interferência.
- 3. Dificuldades com os conceitos da Física Moderna:** alguns estudantes atribuíam propriedades não inerentes aos fótons, como considerá-los como partículas se movendo em curvas senoidais; alguns estudantes não reconheceram algumas diferenças básicas entre o comprimento de onda da luz e o comprimento de onda das partículas de de Broglie, como acreditar que todas as equações usadas para o comprimento de onda da luz são aplicáveis para o comprimento de onda de de Broglie para o elétron.

Em cursos introdutórios de Óptica, são apresentados aos estudantes pelo menos dois modelos diferentes sobre a natureza e o comportamento da luz. Percebeu-se nessa investigação que muitos estudantes não entendem os aspectos básicos desses modelos e nem reconhecem as condições sob as quais cada um poderia ser aplicado. Mesmo os estudantes considerados com maior conhecimento, têm dificuldades conceituais. É impossível construir um modelo coerente de tratamento da luz como o ondulatório, sem o conhecimento de certas idéias básicas tais como: comprimento de onda, caminho de luz, diferença de caminho de luz e diferença de fase. Além disso, como muitos dos aspectos críticos do modelo ondulatório são baseados em inferências e não da observação direta, os estudantes precisam interpretar várias representações abstratas. Percebeu-se também que em cursos mais avançados em Física, os estudantes não necessariamente superam suas dificuldades com assuntos mais básicos. Há necessidade, então, de se dar atenção às dificuldades que estudantes apresentam com o modelo ondulatório da luz (AMBROSE et al 1999).

Percebemos que o objetivo geral dos autores, nessa categoria, é o de evidenciar dificuldades, com o intuito de nos levar a ter consciência delas e que devem ser consideradas. Percebemos poucas sugestões de estratégias de ensino. Na próxima categoria a temática das concepções e dificuldades continua com ênfase a essas estratégias.

2.3. Categoria 3 – Concepções e dificuldades dos estudantes em tópicos de Óptica e estratégias de ensino

Nesta categoria estão os trabalhos que fazem referência às concepções e dificuldades em tópicos de Óptica apresentadas por estudantes, sendo que agora há uma preocupação com a metodologia nas estratégias de ensino, com o intuito de buscar melhores resultados de aprendizagem.

Almeida (2006) investigou as possíveis dificuldades enfrentadas por estudantes no aprendizado de conceitos da Óptica Física e implementou uma estratégia didática que os ajudasse a superá-las, baseada na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel com a utilização de mapas conceituais. Os estudantes eram alunos de graduação matriculados na disciplina Física Geral e Experimental IV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A investigação foi feita com dois grupos de estudantes, sendo um de comparação e o outro experimental. Foram aplicados testes antes e após o tratamento didático e os resultados obtidos foram analisados estatisticamente, para comparar os desempenhos dos dois grupos, a fim de verificar se houve diferença significativa entre eles. Além disso, foi realizada uma análise qualitativa, a partir dos mapas conceituais e das observações juntos aos alunos do grupo experimental, para complementar a análise estatística. O pós-teste foi elaborado a partir

do pré-teste, reordenando as questões e as alternativas, a fim de minimizar qualquer vínculo entre as duas aplicações. Os alunos do grupo experimental assistiram às aulas conforme programa da disciplina Física Geral e Experimental IV e eram orientados a construir mapas conceituais.

Verificou-se que o desempenho dos estudantes no pós-teste, tanto do grupo de comparação como do grupo experimental, foi melhor do que no pré-teste. Porém, o grupo experimental apresentou melhor desempenho. Esse resultado representa fortes indícios de que a utilização dos mapas conceituais, durante os estudos sobre os conceitos da Óptica Física, foi um fator que contribuiu para a aprendizagem desses conteúdos.

O autor também realizou uma análise qualitativa e concluiu que a utilização dos mapas conceituais auxiliou os alunos no aprendizado dos conceitos estudados, confirmando o resultado estatístico, além de levar os estudantes a refletir criticamente sobre os conceitos envolvidos, como e por que são relacionados, permitindo evidenciar e esclarecer as dificuldades na compreensão dos conteúdos abordados.

Para Wosilait et al (1999) há várias evidências que estudantes universitários, após estudarem Óptica Física em cursos introdutórios e cursos mais avançados, freqüentemente não apresentam uma compreensão funcional do modelo ondulatório da luz e nem reconhecem as condições sob as quais o modelo ondulatório ou o modelo de raios deve ser usado. Esses autores entendem que um estudante apresenta compreensão funcional quando tem a habilidade de aplicar conceitos e raciocínios em situações que não sejam aquelas explicitamente estudadas. E para desenvolver uma compreensão funcional dos efeitos de interferência e difração, os estudantes necessitam de mais ajuda do que obtêm usualmente com leituras, atividades experimentais e uso de livros didáticos. Com isso, os autores descrevem um trabalho instrucional que tem mostrado ser efetivo para lidar com essas dificuldades, por meio de um processo de questionamento usando tutoriais, onde estudantes

desenvolvem a compreensão do modelo ondulatório básico da luz que eles podem usar para prever e explicar efeitos de interferência e difração.

Esse trabalho foi desenvolvido com estudantes de Física de um curso introdutório de cálculo da Universidade de Washington. Eles foram submetidos a um conjunto de tutoriais, com ênfase na construção de conceitos, no desenvolvimento de habilidades de raciocínio e no formalismo físico, sem se ater à transmissão de informação e resolução de exercícios tradicionais. Cada tutorial consistia de um pré-teste, planilha, tarefa para casa com uma ou mais questões de exames. A seqüência começa com 10 minutos de pré-teste que serve para o estudante focar sua atenção no tópico a ser abordado no tutorial. Durante a aplicação dos tutoriais, os estudantes trabalham colaborativamente em grupos de três ou quatro elementos. As planilhas consistiam de uma série de questões e exercícios para guiarem os estudantes por meio de raciocínios necessários para desenvolverem uma compreensão funcional do assunto. As tarefas para casa ajudam os estudantes a reforçar e ampliar o que aprenderam. Questões dos tutoriais eram incluídas nos exames e serviam como pós-testes, cujas questões nem sempre eram iguais às do pré-teste.

Durante as sessões do tutorial, instrutores, na maioria das vezes professores assistentes graduados, atuavam com os estudantes através do questionamento. Esses instrutores foram preparados sendo submetidos aos mesmos tutoriais.

Decidiu-se iniciar o processo de desenvolvimento de um modelo ondulatório usando ondas numa cuba com água, porque as frentes de ondas seriam facilmente observadas, fornecendo uma estrutura muito menos abstrata do que aquela das ondas luminosas. Ao verificar como ondas na água se combinam sob diferentes condições, espera-se que os estudantes sejam capazes de aplicar essa idéia na superposição da luz. Então, com o intuito de desenvolver um modelo ondulatório básico, os primeiros tutoriais partiam do padrão de

interferência produzido por ondas planas na superfície da água que difratam em duas fendas. Com isso, esperava-se que os estudantes melhorassem a compreensão das seguintes idéias:

1. Que a diferença de caminhos percorridos pelas ondas que difratam e a diferença de fase, influenciam na formação do padrão de interferência.
2. Que cada fenda estreita se comporta como uma fonte puntiforme de ondas com frentes circulares.
3. Que a Óptica Geométrica não pode ser usada para explicar a difração da luz.
4. Que mudanças nas características do sistema óptico, como mudança da distância entre as fendas, afeta o padrão de interferência.

Foram também usados tutoriais para difração com fendas múltiplas. Com isso, era esperado que os estudantes entendessem que o modelo ondulatório usado para o caso da difração e interferência por fenda dupla poderia ser estendido para múltiplas fendas.

Foram também usados tutoriais para a difração por fenda simples:

1. Desenvolveu-se um modelo simples para difração por uma fenda simples construído diretamente da experiência que o estudante realizou com interferência por fendas múltiplas. Esse enfoque começa com um conjunto finito de fendas muito estreitas e leva o estudante, passo a passo, por meio de um processo limite, à idéia de um número infinito de fontes pontuais coerentes através da largura de uma fenda estreita simples. Os estudantes são levados a fazer uma analogia entre difração por fenda simples e difração por fendas múltiplas, no caso limite quando a separação desaparece e as fendas podem ser consideradas com um número infinito de fontes pontuais.
2. Aplicou-se um tutorial com o objetivo de fazer com que o estudante entendesse que a difração não é um efeito que ocorre só nas bordas da fenda.

3. Aplicou-se um tutorial com o objetivo de fazer com que o estudante acreditasse que a Óptica Geométrica não serve para explicar o que acontece com o padrão de difração quando a largura da fenda é estreitada.
4. Trabalhou-se a idéia de que a largura da fenda não tem que ser, necessariamente, menor do que o comprimento de onda para que ocorra difração.

Nos tutoriais finais, foi tratada a interferência da luz após difratar por duas fendas com larguras finitas, estudando o efeito da largura da fenda e a separação entre elas sobre o padrão de interferência.

A compreensão qualitativa dos conceitos, por parte dos estudantes, tem melhorado com o uso dos tutoriais, melhorando a habilidade na resolução de problemas quantitativos (WOSILAIT et al, 1999).

Mcdermott (2000) identificou, por meio de questões e entrevistas, dificuldades de estudantes universitários em tópicos relacionados à Óptica Física: difração por fenda simples, difração por fenda dupla, difração por fendas múltiplas. A autora concluiu que esses estudantes em geral:

- Não têm bem desenvolvido o modelo ondulatório da luz.
- Não apresentam, necessariamente, conhecimentos qualitativos adequados sobre o modelo ondulatório da luz, quando resolvem com facilidade problemas qualitativos.
- Apresentam dificuldades em interpretar os padrões observados após a difração como resultado da interferência da luz.
- Tendem a usar idéias da Óptica Geométrica para relatar os efeitos da interferência da luz.
- Precisam construir melhor os seus modelos qualitativos e a aplicação desses modelos.
- Não desenvolvem com eficiência habilidades de raciocínio científico ao serem submetidos apenas a formas tradicionais de ensino, baseadas em aulas expositivas.

Com isso, Mcdermott (2000) afirma que os estudantes precisam participar mais do seu processo de construção qualitativa dos modelos e de sua aplicação e sugere o uso de tutoriais nos mesmos moldes propostos por Wosilat et al (1999). Esses tutoriais dão ênfase na construção de conceitos e desenvolvimento de habilidades de raciocínio; foram utilizados para guiarem estudantes na construção de um modelo ondulatório da luz usando os fenômenos de interferência e difração, sem dar ênfase a resolução de problemas quantitativos padrão. Os estudantes submetidos aos tutoriais desenvolveram melhor a compreensão do modelo ondulatório da luz e resolveram com mais habilidade problemas quantitativos.

Os resultados desse estudo indicam que muitos dos estudantes universitários que estudam Óptica Física em cursos básicos, e até em cursos mais avançados, não desenvolvem uma compreensão efetiva do modelo ondulatório da luz. O fato de os estudantes estarem em cursos mais avançados não significa necessariamente que eles superaram sérios problemas conceituais de Física básica. O uso de tutoriais pode fazê-los superar essas dificuldades em pouco tempo, fazendo-os desenvolver uma compreensão efetiva qualitativa de conceitos, estabelecendo uma base firme para a aquisição de habilidades para resolução de problemas quantitativos. As fórmulas ensinadas em cursos tradicionais são facilmente esquecidas, com isso, é mais valioso primeiramente fazer com que os estudantes entendam os conceitos físicos e desenvolvam habilidades de raciocínio (McDERMOTT, 2000).

Gircoreano (1997) elaborou uma série de atividades experimentais simples, capazes de encorajar estudantes do Ensino Médio a exporem seus modelos de explicação sobre a luz e o processo de visão e a reconhecerem eventuais incongruências. Ao invés de se preocupar apenas com aspectos geométricos e com as características de alguns elementos como espelhos, lâminas de faces paralelas, prismas e lentes, procurou analisar o que acontece com a luz quando interage com a matéria. O que se pretendia era dar significado aos conceitos da

Óptica Geométrica como modelo científico, ajustando os procedimentos às concepções prévias que poderiam ir aparecendo durante o processo.

Foi aplicado um teste diagnóstico das concepções prévias a respeito da luz e da visão e realizadas entrevistas com alguns alunos. A partir desses dados, o autor destacou as seguintes concepções:

1. A luz enfraquece com a distância, de forma semelhante ao ímpeto carregado por um corpo, na Mecânica;
2. A luz é onipresente e não identificada com uma fonte particular;
3. O dia é visto como um banho de luz que possibilita a visão, sem uma ligação entre o olho do observador e luz que chega nele;
4. As imagens nos espelhos residem nas suas superfícies;
5. As cores são qualidades dos objetos que variam conforme a intensidade de luz que os atinge;
6. O preto é considerado uma cor;
7. A luz vai do olho até o objeto para captá-lo visualmente.

As atividades seguintes tinham como intuito provocar um conflito cognitivo, abrindo possibilidades para a comparação entre a explicação do estudante e a explicação científica. Conflito esse atingido, segundo o autor, devido ao grau de surpresa dos estudantes, diante dos resultados obtidos em comparação com que eles esperavam obter.

Foi aplicada uma avaliação com o objetivo de identificar o nível de apreensão dos aspectos formais da Óptica Geométrica, após a sequência de atividades. Os estudantes apresentaram enormes dificuldades, o que levou o autor a concluir que deveria trabalhar com muita mais atenção os aspectos formais da teoria. Lembrou ainda que a formalização progressiva dos conceitos não se faz necessariamente no momento em que os assuntos são tratados; é um processo progressivo, em que idéias e concepções vão amadurecendo durante

as atividades. Com isso, o autor procurou sempre apresentar situações e informações que levassem o aluno a pensar sobre aquelas idéias, sem tentar impor a visão científica como a correta, sem esperar que os alunos entendessem tudo.

Notamos que esses autores buscaram metodologias diferentes daquelas tradicionalmente usadas em sala de aula, por entenderem que só as metodologias tradicionais não têm funcionado para se resolver as dificuldades de aprendizagem que os alunos demonstram ter nesse conteúdo.

2.4. Categoria 4 – Argumentos epistemológicos para o ensino de Óptica

Nesta categoria está um artigo que discute a razão pela qual no ensino de Óptica é necessário primeiro dar ênfase ao modelo geométrico de raios de luz, para depois avançar para outros modelos. Os autores procuram justificar seu ponto de vista por meio de argumentos históricos e epistemológicos e não evidenciam dados por meio de uma investigação.

Com intuito de usar o modelo geométrico de raios para estruturar o currículo de ensino de Óptica, Raftopoulos et al (2005) afirmam que o estudo do desenvolvimento histórico dos fenômenos luminosos pode ser uma ferramenta didática útil pelas seguintes razões: o ensino da natureza dos modelos e da Ciência pode ajudar os estudantes a entender a natureza e o papel dos modelos científicos; o desenvolvimento das idéias dos estudantes de um fenômeno é, em alguns casos, similar ao desenvolvimento dos modelos científicos; o modelo geométrico da luz, que é neutro em relação à natureza da luz, pode então ser usado para estruturar uma seqüência de atividades de ensino e aprendizagem conforme o perfil cognitivo dos estudantes.

Esses autores defendem que o modelo geométrico de raios já é necessário para trabalhar com os estudantes os fenômenos da reflexão, refração e dispersão, sem apelar para a natureza da luz, o que simplifica significativamente o tratamento dos fenômenos luminosos. Uma vez que os estudantes tenham dominado esses conceitos geométricos básicos sobre luz, eles podem enfrentar problemas sobre a natureza da luz; se ela apresenta comportamento ondulatório ou corpuscular. Além disso, podem-se mostrar as limitações da teoria corpuscular, por exemplo, na impossibilidade de usá-la na explicação da difração por duas fendas. Isso pode induzir os estudantes a procurar modelos alternativos e então considerar o modelo ondulatório mais útil para essa situação.

A partir desse ponto, seria útil discutir as restrições sobre as quais o modelo geométrico de raios pode ser usado para a real compreensão da Óptica. No ensino tradicional de Óptica é implícito que o modelo geométrico pressupõe uma natureza corpuscular da luz. Essa mensagem implícita não é, na verdade, usada no ensino do modelo geométrico, o que acaba levando os estudantes a encontrar obstáculos na transição para a Óptica Física. Para superar esse problema é importante introduzir uma explícita discussão epistemológica antes: a questão se a luz se comporta como partícula ou como ondas podem ser introduzidas antes (preferivelmente num contexto histórico) não com a finalidade de estabelecer a questão sobre a natureza da luz, mas introduzir a relação entre teorias e modelos, para realçar a situação comum de dois ou mais modelos existindo em paralelo e enfatizar que o modelo geométrico de raios é um meio pelo qual se pode proceder ao estudo dos fenômenos e suas propriedades sem levantar questões sobre a natureza da luz (RAFTOPOULOS et al, 2005).

O que esses autores apresentam é o que tem sido feito comumente: primeiro trabalha-se com a Óptica Geométrica para depois se trabalhar com o modelo ondulatório e o modelo corpuscular. Porém, são feitas ressalvas, já citadas aqui, sobre a importância de, na instrução, colocar o modelo científico no seu devido lugar. No nosso trabalho queremos iniciar com o

modelo ondulatório não em um contexto histórico, mas sim com a sua aplicação nos fenômenos de reflexão, interferência e difração e, daí, evoluir concomitantemente para conceitos da Óptica Geométrica.

2.5. Categoria 5 – Produção de materiais didáticos para o ensino de tópicos de Óptica Física

Nesta categoria estão artigos que orientam como produzir trabalhos com materiais didáticos para serem utilizados em sala de aula.

Catelli e Vicenzi (2002) orientam como transformar o laser de diodo “tipo chaveiro” numa ferramenta útil de laboratório para o ensino de Óptica Física, resolvendo dois problemas: a pouca durabilidade das baterias originais, semelhantes às de relógio e de como manter a chave sempre ligada, que deve ser mantida pressionada para o laser funcionar. Também fornecem exemplos de atividades experimentais diversas na área de Óptica Física.

O primeiro problema é resolvido substituindo as baterias originais por três pilhas comuns do tipo AA, que devem ser montadas em um soquete apropriado. Por sua vez, os fios do soquete são conectados ao laser por meio de duas garras do “tipo jacaré”. Esse aparato pode ser fixado com fita isolante numa base de aproximadamente cinco centímetros de largura por dez centímetros de comprimento, como por exemplo, uma pequena tábua.

O segundo problema é resolvido com um pedaço de fita isolante bem apertado em volta do laser, ou com um prendedor de roupa que, além de manter o laser ligado, evitará que este role sobre a superfície de apoio, caso não seja usada nenhuma base para ele.

Com esse aparato são sugeridas as seguintes atividades: difração em fios, difração em fendas, difração em orifícios.

Cavalcante et al (1999) propõem um trabalho que permite compreender fenômenos de interferência e difração realizando uma atividade experimental, que pode ser reproduzida em sala de aula, uma vez que todo o equipamento é construído a partir de material caseiro de fácil acesso.

A proposta é a de utilizar uma caneta laser como fonte de radiação a ser analisada e um CD como rede de difração. Neste trabalho o objetivo inicial foi determinar o número de sulcos/mm do CD utilizando uma caneta laser. Para isto foi necessário determinar previamente o valor do comprimento de onda emitido pela caneta. Com esse trabalho é possível demonstrar que o CD pode ser utilizado como uma rede de difração, já que apresenta uma quantidade de sulcos por milímetro da ordem do comprimento de onda do laser.

Filho (1998) apresenta uma técnica de produção de material didático para visualizar um instantâneo de padrão de interferência na experiência de Young. Trata-se da preparação de um conjunto de lâminas transparentes para retroprojeter.

É preciso confeccionar um conjunto de quatro lâminas transparentes. A preparação consiste em fazer duas fotocópias, sobre as lâminas, de cada uma das figuras que representam frentes de ondas concêntricas, produzidas por fontes pontuais localizadas no seu centro comum. O comprimento de onda padrão mostrado em uma figura deve ser o dobro da outra figura. O espaçamento entre os círculos é igual às suas espessuras. Esse espaçamento é necessário para que as figuras fiquem bem nítidas (*op. cit.*).

De posse dessas lâminas, basta colocá-las, um par de cada vez, superposto sobre um retroprojeter, produzindo uma figura que representa um instantâneo do padrão de interferência da experiência de Young.

Segundo Filho (1998), apesar desse material ser bastante simples, produz uma boa representação do experimento de Young. Mesmo sendo uma representação estática, pode ser uma alternativa viável à falta de um equipamento adequado para a realização dessa atividade experimental, podendo enriquecer uma aula sobre interferência de ondas.

Examinando esses artigos, podemos perceber o interesse desses autores em levar a Óptica Física às salas de aula de uma maneira prática e simples. Diante das condições da escola onde nosso trabalho foi desenvolvido, onde não existe um laboratório de Física, idéias como as desses autores serão aproveitadas para produzirmos as situações que o nosso referencial teórico exige.

2.6. Conclusões da Revisão da Literatura

A partir das informações desta revisão de literatura, percebemos alguns autores já preocupados com a excessiva ênfase à Óptica Geométrica no ensino, em detrimento da Óptica Física, levando os alunos, mais tarde, a terem dificuldades para entender outros modelos, e com sérias dificuldades para lidar com o modelo ondulatório em cursos mais avançados. Para Paulo et al (1997) a discussão sobre a natureza da luz deve ser feita antes do estudo da Óptica Geométrica; Galili e Lavrik (1998) lembra que a preferência em apresentar a Óptica introdutória em termos de raios de luz pode reforçar nos estudantes concepções cientificamente incorretas. Isso vem de encontro ao nosso trabalho, que pretende justamente verificar a viabilidade de se discutir fenômenos luminosos a partir do modelo ondulatório.

Observamos alguns trabalhos onde foram detectadas dificuldades relativas às concepções de estudantes sobre a luz e fenômenos luminosos. Dentro do nosso referencial

teórico, conhecer o que o aluno já sabe é elemento importante para criarmos condições mais propícias à aprendizagem; esse tipo de levantamento foi feito nos alunos submetidos ao nosso tratamento.

Por fim, notamos vários autores preocupados em desenvolver estratégias de ensino e materiais didáticos para viabilizar a aprendizagem em tópicos sobre a luz. Isso vem de encontro aos nossos objetivos neste trabalho; pretendemos criar condições mais propícias para o estudante evoluir conceitualmente ao ser submetido ao nosso tratamento.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste estudo a nossa intenção é a de começar um curso de Óptica em nível de ensino médio a partir da Óptica Ondulatória, com o intuito de verificar indícios de evolução conceitual e procurar evidências de aprendizagem, pelos alunos, de conceitos cientificamente aceitos a partir dos seus conhecimentos prévios.

Barthem (2005) lembra que as equações da Óptica Geométrica fornecem uma explicação satisfatória para a reflexão e refração da luz, mas não para a difração e interferência. Só com o advento da teoria ondulatória da luz, na segunda metade do século XVII, tivemos uma teoria capaz de prever todos os resultados da Óptica Geométrica e explicar a difração e interferência. Com isso, então, começamos um curso de Óptica pela teoria ondulatória nos dá a possibilidade de, mais tarde, avançarmos para o modelo de raios de luz como uma simplificação do modelo ondulatório.

A nossa prática no Ensino Médio tem mostrado que quando trabalhamos com Óptica, a ênfase é dada aos aspectos geométricos, baseados no conceito de raio de luz, representados por segmentos de retas num plano. Essa maneira tradicional de estudar Óptica não deixa evidente que a luz se propaga num espaço tridimensional, que há uma fonte de luz e que existem obstáculos para a propagação; os aspectos concernentes à natureza da luz são, em geral, desconsiderados (GIRCOREANO e PACCA, 2001). Acreditamos que ao mudarmos a ênfase para a teoria ondulatória, poderemos evidenciar com mais facilidade esses aspectos.

A base teórica deste estudo é a teoria dos campos conceituais de Vergnaud. Ela é uma teoria cognitivista do processo de conceitualização do real; ela pressupõe que a aquisição do conhecimento está determinada pelas situações abordadas pelo sujeito e pelas ações que ele executa durante sua resolução (SOUSA e FÁVERO, 2002). A potencialidade dessa teoria está

na possibilidade de compreender os processos que subjaz a cognição, em particular a construção de representações internas do sujeito (ANDRÉS e PESA, 2004). Pode-se dizer que essa teoria é potencialmente útil na análise das dificuldades dos alunos na resolução de problemas em ciências, na aprendizagem de conceitos científicos e na evolução conceitual. Uma vez identificadas tais dificuldades, essa mesma teoria pode ajudar na seleção de situações instrucionais que possam ajudar na superação progressiva dessas dificuldades. Esse domínio progressivo implica capacidade de resolver problemas, conceitualização e evolução conceitual (MOREIRA, 2002). Como a nossa proposta de trabalho é empreender estratégias de ensino que dê condições mais eficazes para o estudante evoluir conceitualmente, e para isso acreditamos que temos que conhecer os mecanismos pelos quais o sujeito aprende, acreditamos que essa teoria é ideal para nos orientar perante as situações que trabalhamos com os estudantes em nosso estudo.

Segundo Vergnaud, o conhecimento se encontra organizado em campos conceituais, do quais o sujeito se apropria ao longo do tempo, através de experiência, maturidade e aprendizagem. Campos conceituais podem ser definidos como grandes conjuntos, informais e heterogêneos, de situações-problema cuja análise e tratamento requerem diversas classes de conceitos, procedimentos e representações simbólicas que se conectam umas com as outras (GRECA e MOREIRA, 2002).

Em 1982, Vergnaud se referia a campo conceitual como

“...um conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento conectados uns aos outros e provavelmente entrelaçados no processo de aquisição. Por exemplo, os conceitos de multiplicação, divisão, fração, razão, proporção, função linear, número racional, similaridade, espaço vetorial e análise dimensional pertencem todos a um grande campo conceitual que é o das estruturas multiplicativas.” (VERGNAUD, 1982 apud SOUSA e FÁVERO, 2002).

Segundo Greca e Moreira (2002), os componentes de um campo conceitual formam uma unidade de estudo que pode ser tratada independentemente de outras unidades. Podemos perceber isso na didatização do conhecimento científico, quando há uma separação em conjuntos que podem ser tratados independentemente, como, por exemplo, em Física, o conjunto de conhecimentos da Mecânica, da Eletricidade e da Termologia. O próprio Vergnaud centrou-se no estudo dos campos conceituais das estruturas aditivas e multiplicativas.

A teoria dos campos conceituais parte do pressuposto que a essência do desenvolvimento cognitivo é a conceitualização. Isso porque Vergnaud considera que o fator essencial da dificuldade dos estudantes com a resolução de problemas de Matemática, que Greca e Moreira (2002) estendem para problemas em Física, é a dificuldade do sujeito em relacionar convenientemente os conceitos pertinentes à situação proposta.

Um campo conceitual é, em primeiro lugar, um conjunto de situações, cujo domínio requer o domínio de vários conceitos de naturezas distintas. São as situações e não os conceitos que constituem a principal entrada de um campo conceitual, porque os conceitos só se tornam significativos através de situações. São as situações que dão sentido aos conceitos, mas o sentido não está nas situações em si. Um conceito torna-se significativo para o sujeito através de uma variedade de situações e diferentes aspectos de um mesmo conceito estão envolvidos em distintas situações. Ao mesmo tempo, uma situação não pode ser analisada através de um só conceito, vários deles são necessários. E esta é a razão pela qual se deve estudar campos conceituais, não situações isoladas ou conceitos isolados. Para Vergnaud uma situação é entendida como uma tarefa; no âmbito das ciências, situação significa também problema. A resolução de problemas ou as situações de resolução de problemas são essenciais para a conceitualização porque tornam os conceitos significativos (MOREIRA, 2002; SOUSA

e FÁVERO, 2002). Vergnaud define conceito como sendo composto em três conjuntos (*op. cit.*):

- S (o referente): é um conjunto de situações que dão sentido ao conceito;
- I (o significado): é um conjunto de invariantes (objetos, propriedades e relações) sobre os quais repousa a operacionalidade do conceito, também denominado invariantes operatórios associados ao conceito, ou o conjunto de invariantes que podem ser reconhecidos e usados pelos sujeitos para analisar e dominar as situações do primeiro conjunto;
- R (o significante): é um conjunto de representações simbólicas (linguagem natural, gráficos e diagramas, sentenças formais, etc.) que podem ser usadas para indicar e representar esses invariantes e, conseqüentemente, representar as situações e os procedimentos para lidar com elas.

O sentido de um conceito está na relação do sujeito com as situações e os significantes. Precisamente são os esquemas que constituem o sentido dessa situação ou desse significante para esse sujeito. Vergnaud chama de esquemas as ações e sua organização invariante evocadas em um sujeito por uma situação ou por um significante. Os esquemas têm como ingredientes os invariantes operatórios, ou seja, os conceitos-em-ação e teoremas-em-ação, constituindo os conhecimentos contidos nos esquemas (ESCUADERO e MOREIRA, 2002).

Teorema-em-ação é uma proposição que pode ser verdadeira ou falsa; conceito-em-ação é uma categoria de pensamento tida como pertinente. Esse conhecimento é precisamente implícito e o aprendiz tem dificuldade em explicitá-lo porque geralmente existe uma lacuna considerável entre os invariantes que o sujeito constrói e os invariantes que constituem o conhecimento científico (MOREIRA, 2002).

O conceito de esquema proporciona o vínculo indispensável entre conduta e representação: a relação entre situações e esquemas é a fonte primária da representação e, por

tanto, da conceitualização. São os invariantes operatórios disponíveis na estrutura cognitiva do sujeito que fazem a articulação essencial entre teoria e prática, pois a percepção, a busca e a seleção de informação baseiam-se inteiramente no sistema de conceitos-em-ação disponíveis para o sujeito e os teoremas-em-ação subjacentes à sua conduta. Decorre daí que o desenvolvimento cognitivo consiste sobretudo, e principalmente, no desenvolvimento de um vasto repertório de esquemas (ESCUDEIRO e MOREIRA, 2002).

Um conceito-em-ação não é um verdadeiro conceito científico, nem um teorema-em-ação é um verdadeiro teorema a menos que se tornem explícitos. Na Ciência, conceitos e teoremas são explícitos e pode-se discutir sua pertinência e sua veracidade; o conhecimento explícito pode ser comunicado a outros e discutido, o conhecimento implícito não. Pelo processo de explicitação do conhecimento implícito que os teoremas e conceitos-em-ação podem ser convertidos em verdadeiros teoremas e conceitos científicos (MOREIRA, 2002).

Em geral, os estudantes não são capazes de explicar ou mesmo expressar em linguagem natural seus teoremas e conceitos-em-ação. A maioria desses conceitos e teoremas-em-ação permanecem implícitos, mas eles podem também ser explícitos, ou tornarem-se explícitos, e aí entra o ensino: ajudar o estudante a construir conceitos e teoremas explícitos, e cientificamente aceitos, a partir do conhecimento implícito. É nesse sentido que conceitos-em-ação e teoremas-em-ação podem, progressivamente, tornarem-se verdadeiros conceitos e teoremas científicos, mas isso pode levar muito tempo (*op. cit.*).

A teoria dos campos conceituais destaca que a aquisição de conhecimento é moldada pelas situações e problemas previamente dominados. Assim, muitas de nossas concepções vêm das primeiras situações que fomos capazes de dominar ou de nossa experiência tentando modificá-las. (*op. cit.*).

Muitos consideram as concepções prévias dos estudantes como erros em relação às concepções científicas. Para Vergnaud, essa maneira de conceber o conhecimento prévio

supõe o aprendiz como incompleto, imperfeito ou deficiente em comparação ao especialista. Essa abordagem, segundo ele, é inadequada às questões do desenvolvimento cognitivo aí envolvido. Seria mais frutífero considerar o sujeito como um sistema dinâmico, com mecanismos regulatórios capazes de assegurar seu progresso cognitivo (*op. cit.*).

Para Moreira (2002), as idéias de Vergnaud sobre o papel do conhecimento prévio como precursor de novos conhecimentos (que podem ser científicos) e sobre as continuidades e rupturas na construção do conhecimento, parecem ter muito a ver com a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. Para Ausubel, na aprendizagem significativa o conhecimento prévio é o ponto de partida para o novo conhecimento. Porém, no ensino é preciso identificar sobre quais conhecimentos prévios os estudantes podem se apoiar para aprender, e em certos casos é preciso romper com o conhecimento prévio.

No tocante à importância do conhecimento prévio para a elaboração das situações que trabalharemos com os estudantes, recorreremos às idéias de Ausubel sobre a aprendizagem significativa para melhor fundamentar nossa ação. Segundo Moreira (1999), a aprendizagem significativa implica relacionar, de forma não-arbitrária e substantiva (não-literal), uma nova informação a outras com as quais o indivíduo já esteja familiarizado e quando esse indivíduo adota uma estratégia correspondente para assim proceder. Dessa definição, podemos destacar três itens:

- Não-arbitrariedade: a nova informação não se relaciona com qualquer aspecto preexistente na estrutura cognitiva, mas com conhecimentos especificamente relevantes existentes, que Ausubel denomina subsunçores.
- Substantividade: ao se aprender de forma significativa, retêm-se a substância das novas idéias, não as palavras precisas usadas para sua expressão.
- Atitude pro ativa: O indivíduo deve estar disposto a conectar de maneira não-arbitrária e não-literal o novo conhecimento com a sua estrutura cognitiva pré-existente.

Segundo Ausubel, a organização do conteúdo cognitivo, em uma determinada área de conhecimento, na mente de um indivíduo, tende a uma estrutura hierárquica na qual as idéias mais inclusivas e gerais se situam no topo desta estrutura e, progressivamente, abrangem proposições, conceitos e fatos menos inclusivos e mais diferenciados, porque é menos difícil para seres humanos captar aspectos diferenciados de um todo mais inclusivo previamente aprendido, do que chegar ao todo a partir de suas partes diferenciadas previamente aprendidas. Com isso, para facilitar a aprendizagem significativa, Ausubel propõe que a programação do conteúdo a ser ensinado obedeça basicamente a dois princípios (MOREIRA, 1999):

- Diferenciação progressiva: é o princípio segundo o qual as idéias, conceitos, proposições mais gerais e inclusivos do conteúdo devem ser apresentados no início da instrução e, progressivamente, diferenciados em termos de detalhe e especificidade.
- Reconciliação integrativa: é o princípio segundo o qual a instrução deve explorar relações entre idéias, apontar similaridades e diferenças importantes e reconciliar discrepâncias reais ou aparentes.

No tocante à postura do professor na facilitação da aprendizagem significativa, Moreira (1999) aponta quatro tarefas fundamentais:

- Identificar, na matéria de ensino, os conceitos e princípios unificadores, inclusivos, com maior poder explanatório e propriedades integradoras, e organizá-los hierarquicamente de modo que, progressivamente, abranjam os menos inclusivos até chegar aos exemplos e dados específicos.
- Identificar quais os subsunçores (conceitos, proposições, idéias claras, precisas, estáveis) relevantes à aprendizagem do conteúdo a ser ensinado, que o aluno deveria ter em sua estrutura cognitiva para poder aprender significativamente este conteúdo.

- Diagnosticar aquilo que o aluno já sabe; determinar, dentre os subsunçores especificamente relevantes (previamente identificados ao organizar a matéria de ensino), quais os que estão disponíveis na estrutura cognitiva do aluno.
- Auxiliar o aluno a assimilar a estrutura da matéria de ensino e organizar sua própria estrutura cognitiva nessa área de conhecimentos, por meio da aquisição de significados claros, estáveis e transferíveis.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho com os alunos, são propostas situações em forma de tarefas, como propõe Vergnaud, inicialmente com intuito de identificarmos quais conceitos-em-ação e teoremas-em-ação os estudantes apresentam. Esses conhecimentos em ação identificados, segundo a teoria de Ausubel, comporão o conhecimento prévio dentre os quais selecionaremos os relevantes para o processo de conceitualização. Como sugere Moreira (2002), a teoria de Vergnaud pode ser usada para analisar as dificuldades dos estudantes na conceitualização em Ciências em termo de invariantes operatórios, ou seja, em termos de quais os conceitos e teoremas-em-ação que os estudantes estariam usando e de quão distantes estariam dos conceitos e teoremas científicos adequados à resolução do problema em pauta.

4. O PRODUTO EDUCACIONAL

A proposta deste trabalho foi a de verificar a viabilidade de iniciar o estudo da Óptica em nível médio a partir da teoria ondulatória e, concomitantemente, introduzir tópicos sobre a luz no contexto das situações propostas aos alunos, tal como preconiza a teoria dos campos conceituais. Neste capítulo é apresentado o produto educacional deste trabalho, que resultou na proposição de um conjunto de ações descritas em um manual aos professores, no qual é descrito toda a seqüência de situações elaboradas por nós para fazer com que os alunos explicitassem seus conhecimentos-em-ação e, a partir deles, criármos condições de promover a evolução conceitual pelos alunos.

4.1. A seqüência da proposta

Para Vergnaud uma situação, ou um conjunto delas, se caracteriza para o aluno, basicamente como uma tarefa a cumprir. Para o aluno dar conta das tarefas propostas, as aulas foram baseadas em atividades experimentais interativas e perguntas em forma de questionamento. A partir das respostas, tentamos fazer com que os conceitos e teoremas-em-ação fossem explicitados para tentar aproximá-los daqueles cientificamente aceitos. Todo esse conjunto de procedimentos compõe as situações propostas aos alunos.

Ao procurar explicitar os conhecimentos-em-ação tendo como motivador as atividades experimentais e as perguntas, procurávamos conhecer o que o aluno já sabia, selecionávamos as respostas que eram pertinentes e procurávamos evoluir para os conceitos cientificamente

aceitos. Esse processo está relacionado também com a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, porque em vários momentos do nosso tratamento buscávamos indícios de conhecimentos prévios relevantes para a assimilação do novo conhecimento.

4.1.1. Identificação dos conhecimentos prévios relevantes

Nesta seção queremos identificar os conhecimentos prévios relevantes para começar a falar de movimento ondulatório. Para isso, consideramos necessário o aluno saber que um ponto material está em movimento quando sua posição muda em relação a um referencial e que ondas são geradas a partir de movimentos oscilatórios.

1ª aula:

Começamos enfatizando que corpos se movem e que, para efeito de simplificação, vamos considerá-los como pontos materiais (a dinâmica e a cinemática de corpos extensos não são estudadas em cursos de nível médio, apenas a estática). Então perguntamos: o que a palavra movimento lembra? Em seguida anotamos no quadro as respostas.

Realizamos uma breve discussão sobre o que foi visto em Física 1, partindo das respostas escritas no quadro e procurando dar destaque às seguintes grandezas: velocidade, aceleração, força, energia mecânica e quantidade de movimento. Ressaltamos que força é também o agente modificador de um movimento. Em Física 1 basicamente é estudado a cinemática e a dinâmica do ponto material.

Em seguida perguntamos: o que é movimento ondulatório? As respostas são anotadas no quadro.

Enfatizamos que a partir do estudo do movimento de um ponto material visto em Física 1 passaremos ao estudo de um novo tipo de movimento (ondulatório), a partir do qual chegaremos a outras conclusões.

2ª aula:

Nesta aula aplicamos o pré-teste (apêndice A).

4.1.2. Conceitos iniciais sobre ondas

Nesta seção queremos trabalhar situações a partir das quais possamos discutir os princípios e conceitos fundamentais sobre ondas.

3ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Conceito de ondas.
- Propriedade fundamental das ondas.
- Classificação de ondas (quanto à direção de propagação, quanto à direção de vibração e quanto à natureza).

Após um momento no qual apresentamos ondas produzidas nas molas e na cuba, e ao nos referirmos a essas propagações como movimentos ondulatórios, passamos a explicitar os conhecimentos-em-ação por meio da seguinte seqüência de perguntas:

- Observe as molas esticadas e a porção de água na cuba; como produzir movimentos ondulatórios nesses meios?
- Observe e imagine um ponto na água ou na mola durante a propagação das ondas; como esse ponto se movimenta?

- Identifique a fonte das ondas em cada caso; como ela se movimenta?
- Você visualizou ondas se propagando ao longo das molas e na superfície da água; como você produziria ondas se propagando no ar?
- As ondas que podem ser representadas se propagando ao longo de uma linha são denominadas ondas unidimensionais; as ondas visualizadas se propagando na superfície da água podem ser classificadas como unidimensionais? E as ondas produzidas no ar?

Após as respostas, e na medida do possível, já discutíamos os tópicos propostos em cada aula.

Muitas vezes, dependendo do momento, a atividade experimental pode ser repetida antes, durante ou após uma pergunta. A partir das respostas que vão sendo obtidas, acreditamos que conhecimentos-em-ação são explicitados, pois o aluno é colocado diante de um problema; então, é solicitado dele uma proposta de solução para esse problema.

4ª aula:

Começamos apresentando as ondas nas molas e na cuba e procedemos a uma rápida revisão do que foi discutido na última aula. Por meio de uma aula expositiva formalizamos os tópicos propostos para a 3ª aula.

5ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Elementos de ondas periódicas transversais (vales, cristas, amplitude, período, frequência e comprimento de onda).

Mais uma vez começamos apresentando as ondas nas molas e na cuba e passamos para a seguinte seqüência de perguntas e procedimentos:

- Ao se produzir uma onda transversal e unidimensional em uma mola gerada pelo movimento de sua mão, qual será o desenho da onda, imediatamente antes do movimento da mão se repetir? Utilizando a mola damos a entender que esse movimento é

correspondente a uma oscilação completa e pedimos para um aluno fazer um desenho no quadro. A partir das respostas obtidas, conceituamos comprimento de onda e período.

- A partir do desenho obtido marcamos o comprimento de onda com o seu símbolo usual (λ), e conceituamos crista, vale e amplitude. Chamamos atenção para o fato de que estamos trabalhando com uma onda periódica unidimensional não amortecida, ou seja, uma onda produzida por uma sucessão de pulsos regulares, cujo formato se repete em intervalos de tempo iguais.
- Suponha que minha mão repetiu o movimento, por exemplo, 20 vezes em 10 segundos; quantas vezes a mão repetiu esse movimento em 1 segundo? Usando a mola, mostramos o movimento correspondente a uma oscilação completa, e enfatizamos que agora são 20 oscilações completas em 10 segundos. A partir das respostas, conceituamos frequência com seu símbolo usual (f). Também chamamos a atenção à unidade de frequência (hertz) no Sistema Internacional e o seu símbolo (Hz).
- Pedimos para calcularem o tempo gasto para a mão executar uma oscilação completa. A partir das respostas, enfatizamos o conceito de período com seu símbolo usual (T) e a sua relação com a frequência. Também chamamos a atenção à unidade de período (segundo) no Sistema Internacional e o seu símbolo (s).

6ª aula:

Tópico a ser abordado:

- A equação fundamental das ondas.

Começamos apresentando as ondas nas molas e na cuba e passamos para a seguinte seqüência de perguntas e procedimentos:

- Como se pode notar, ondas se movem; logo, podemos calcular suas velocidades. Levando em conta que essas ondas produzidas executam um movimento cujo valor da velocidade é constante, proponha uma maneira para se calcular esse valor.

- Suponha que uma onda percorreu, por exemplo, 10 metros em 5 segundos mantendo-se no mesmo meio; quantos metros ela percorreu em 1 segundo? Como se chama essa grandeza?
- Se trocarmos os 10 metros pelo comprimento de onda (λ), o tempo gasto passa a ter um nome especial; qual é esse nome? A partir das respostas, tentamos, ao final, apresentar a equação fundamental das ondas.

7ª aula:

Revisão dos tópicos da 5ª e 6ª aulas por meio de uma aula expositiva, usando as molas e a cuba, procurando formalizar no quadro todos os conceitos propostos.

8ª aula:

Aplicação do primeiro teste avaliativo (apêndice B).

4.1.3. Reflexão

Nesta seção discutimos o fenômeno da reflexão de ondas e a sua similaridade com a reflexão de feixes de luz. Como material usamos, mais uma vez, molas *slinky* para apresentarmos reflexão de ondas unidimensionais, uma cuba sobre um retroprojeter para apresentarmos reflexão de ondas com frentes retas e circulares (usamos como obstáculos planos, peças de madeira e como obstáculo curvos, arcos metálicos com formatos cilíndricos), uma caneta que emite feixe de laser para apresentarmos a reflexão da luz (como obstáculos usamos espelhos planos e superfícies espelhadas com formatos cilíndricos).

9ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Reflexão de ondas unidimensionais com e sem inversão de fase.
- Representação de frentes de onda retas e circulares na cuba.
- Conceitos de raios de onda e frentes de onda.
- Reflexão de ondas bidimensionais em superfícies planas produzidas na superfície da água com frentes retas.
- Conceitos de reta normal, ângulo de incidência e ângulo de reflexão.
- Lei da reflexão ondulatória.

Passamos para a seguinte seqüência de procedimentos e perguntas:

- Apresentação de um pulso transversal produzido na mola, no chão, e a sua reflexão em uma extremidade fixa. O que acontece com o pulso quando atinge a extremidade fixa?
- Apresentação de um pulso transversal produzido na mola, no chão, e a sua reflexão em uma extremidade móvel. O que acontece com o pulso quando atinge a extremidade móvel?
- Representação desses pulsos no quadro.
- Apresentação de ondas bidimensionais com frentes retas (usando uma régua) e circulares (usando o dedo) na cuba.
- Proponha uma maneira para representarmos essas ondas no quadro.
- Como indicaríamos o sentido de propagação dessas ondas produzidas?
- A partir das respostas conceituar raios e frentes de onda.
- Apresentação de uma onda com frentes retas na cuba, com ângulo de incidência igual a 0° , sendo interceptada por obstáculo plano. O que acontece com essa onda quando é interceptada? Como você representaria esse fato no quadro?
- Apresentação de uma onda com frentes retas na cuba, com ângulo de incidência diferente de 0° , sendo interceptada por obstáculo plano. O que acontece com essa onda quando é

interceptada? Como você representaria esse fato no quadro? A partir das respostas dos alunos, conceituar reta normal, ângulo de incidência e ângulo de reflexão.

- Compare os ângulos de incidência e reflexão. A partir das respostas, enunciar a lei da reflexão ondulatória.

10ª aula

Tópicos a serem abordados:

- Reflexão de ondas bidimensionais em superfícies curvas produzidas na superfície da água com frentes retas.

Seqüência de procedimentos e perguntas:

- Apresentação de ondas com frentes retas na cuba de ondas, sendo interceptadas por obstáculos planos, retomando pontos da aula passada.
- Apresentação de ondas com frentes retas na cuba de ondas, sendo interceptadas por obstáculos côncavos e convexos.
- Como a onda com frentes retas interceptada por um obstáculo côncavo refletiu?
- Como você desenharia os raios dessa onda refletida?
- Como a onda com frentes retas interceptada por um obstáculo convexo refletiu?
- Como você desenharia os raios dessa onda refletida?
- Qual é o formato das frentes refletidas? Como você as desenharia no quadro?

11ª aula:

Revisão dos tópicos das 9ª e 10ª aulas quando repetimos todas as atividades experimentais executadas e por meio de uma aula expositiva formalizamos por escrito todos os conceitos discutidos.

12ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Reflexão de feixes de luz em espelhos planos e curvos.

- Analogia entre as leis da reflexão para os raios de onda e feixes de luz.
- Introdução da idéia do comportamento ondulatório da luz, pela similaridade da reflexão de feixes de luz com raios de onda.

Após uma rápida revisão dos resultados obtidos com o fenômeno da reflexão na cuba, apresentamos obstáculos com os mesmos formatos, mas agora espelhados e, ao invés de ondas na água, sendo interceptadas, usamos feixes de laser provenientes de uma caneta. Passamos, então, para a seguinte seqüência de procedimentos e perguntas:

- O que acontecerá se eu incidir um feixe de laser no espelho plano? Esperamos as respostas e, a seguir, apresentamos feixes de laser refletindo em um espelho plano e repetimos a pergunta.
- Observe como o feixe se comporta quando reflete e compare com um raio de onda sendo refletido por uma superfície plana na cuba de ondas; vocês percebem alguma similaridade?
- O que acontecerá se incidirmos um feixe de laser no espelho côncavo e convexo? Esperamos as respostas e, a seguir, apresentamos feixes de laser refletindo nessas superfícies e repetimos a pergunta.
- Representação desses fenômenos no quadro negro, usando o modelo de raio de luz. Nesse momento, aproveitamos para apresentar o conceito de raio de luz como uma forma aceitável de representarmos graficamente um feixe de luz estreito.
- Qual a relação, nesses casos, entre os ângulos de incidência e reflexão?
- Raios de onda e raios de luz refletem obedecendo as mesmas leis; o que isso sugere?
- Pela similaridade entre o comportamento das ondas na superfície da água sofrendo reflexão e os feixes de luz sofrendo reflexão, podemos dizer que a luz possui comportamento ondulatório? Por quê?

13ª aula:

Revisão dos tópicos das 9ª, 10ª e 12ª aulas quando repetimos todas as atividades experimentais já realizadas.

14ª aula:

Aplicação do segundo teste avaliativo (apêndice C).

4.1.4. Interferência

Nesta seção discutimos o fenômeno da interferência de ondas usando as molas *slinky*, cuba de ondas e um material produzido por Filho (1998): círculos concêntricos impressos em duas lâminas transparentes para retroprojektor (anexo A) e figura de interferência (anexo B).

15ª aula

Tópicos a serem abordados:

- Interferência construtiva e destrutiva de pulsos transversais em molas *slinky*.
- Interferência na cuba a partir de duas fontes, em fase, gerando ondas com frentes circulares.

Após várias apresentações de dois pulsos transversais e opostos, com mesma fase e com fases opostas, produzidos numa mola no chão, com o intuito de apresentar a interferência construtiva e destrutiva, passamos para seguinte seqüência de perguntas e procedimentos:

- O que acontece com os pulsos quando eles estão em fase?
- O que acontece com os pulsos quando eles estão com fases opostas? A partir das respostas, discutir o princípio da superposição, interferência construtiva e destrutiva.
- O fenômeno da interferência ocorre com outras ondas?

- Produzimos uma onda com frentes circulares na água, batendo com o dedo; como produzir outra onda idêntica para se encontrar com a primeira? Nesse momento usa-se a cuba.
- O que acontece com as frentes circulares após o encontro?
- Será que nesse caso ocorre interferência construtiva e destrutiva?
- Batendo simultaneamente os dois dedos na água fazendo com que essas ondas se cruzem, como você esquematizaria no quadro? Esperamos que nesse momento o aluno reconheça que círculos concêntricos superpostos é uma maneira razoável de se representar esse fenômeno, desenhamos esse esquema no quadro e começamos a trabalhar com ele.
- Levando em conta que os círculos representam as cristas, o que acontece no momento em que a crista de uma se encontra com a crista da outra?
- Nesse momento há uma interferência; que tipo de interferência é essa? A partir das respostas tentamos fazer com que o aluno visualize os vários pontos onde há interferência construtiva.
- O que acontece quando há encontro de crista com vale? Nesse momento trabalhamos o esquema no quadro.
- E quando há encontro de vale com crista?

16ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Interferência na cuba a partir de duas fontes, em fase, gerando ondas com frentes circulares.
- Linhas nodais.

Após uma revisão da última aula, repassando rapidamente todos os passos, apresentamos círculos concêntricos impressos em uma lâmina transparente para retroprojeter (anexo A), como uma representação aceita para ondas com frentes circulares produzidas na

superfície da água; essa figura é projetada na parede. Passamos, então, para a seguinte seqüência de procedimentos e perguntas:

- Esses círculos simulam um instantâneo das frentes de onda circulares produzidas na água; o que deve ser feito para representarmos outro conjunto de frentes de onda se encontrando com o primeiro conjunto? Esperamos que o aluno responda que precisamos ter outra figura idêntica, a qual é apresentada em seguida.
- Agora vamos superpor esses dois círculos e observe a figura projetada na parede (anexo B). Nessa figura, exploramos os pontos de interferência construtiva, destrutiva e conceituamos linhas nodais.

17ª e 18ª aulas:

Nessas aulas revisamos os tópicos da 15ª e 16ª aulas, repetindo rapidamente todas as atividades experimentais, os procedimentos, as perguntas e trabalhamos uma lista de exercícios (apêndice G).

19ª aula:

Aplicação do terceiro teste avaliativo (apêndice D).

4.1.5. Difração

Nesta seção queremos evidenciar o caráter ondulatório da luz, a partir do fenômeno da difração. Usamos a cuba, obstáculos planos de madeira, feixe laser, pequenos obstáculos (dentes de um pente, fio de náilon e cílios postiços) e pequenas fendas produzidas com um corte de estilete em um papel escuro; esse papel e o fio de náilon foram montados em molduras para *slide*.

20ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Difração de ondas com frentes retas e circulares na cuba por obstáculos planos e por fendas.

Antes da apresentação da difração na cuba de ondas, foram esquematizadas no quadro algumas situações nas quais frentes de onda retas são parcialmente interceptadas por obstáculos e se questionou qual seria o formato das frentes não interceptadas. A partir da discussão gerada, são reproduzidas na cuba todas as situações propostas, usando como obstáculos pedaços de madeira; essas situações são justamente aquelas propostas na segunda questão do quarto teste (apêndice E). Passamos, então, para a seguinte seqüência de perguntas:

- Quando uma onda com frentes retas é parcialmente interceptada por um obstáculo, na cuba, qual será o formato das frentes não interceptadas? E se as frentes fossem circulares?
- Quando uma onda com frentes retas atravessa uma fenda, na cuba, qual será o formato das frentes que atravessam? E se as frentes fossem circulares?

21ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Difração de ondas com frentes retas e circulares na cuba por obstáculos planos e por fendas.
- Evidenciar as fendas se comportando como fontes de ondas com frentes circulares.
- Evidenciar uma figura de interferência da difração por fendas duplas.

Essa aula é iniciada com a repetição das atividades experimentais executadas na última aula e a esquematização no quadro dos casos discutidos naquela oportunidade. Passamos, então, para a seguinte seqüência de perguntas e procedimentos, após (ou durante) a apresentação da difração por fenda simples na cuba:

- Compare, nesse caso, a onda difratada e a onda produzida quando o meu dedo toca na água; qual é a diferença? Após as resposta, apresentamos a difração por fenda dupla.
- Observe as ondas difratadas; o que acontece?
- Compare, nesse caso, a onda difratada por fenda dupla e a onda produzida quando dois dedos tocam simultaneamente a água; qual a diferença? Repetimos essas atividades na cuba. Tentamos fazer com que o aluno perceba a similaridade desses casos e a formação de figuras de interferência.

22ª aula:

Tópicos a serem abordados:

- Difração de feixes laser em fendas simples.
- Difração de feixes laser em dentes de um pente, em um fio de náilon e em cílios postiços.
- Formação de figuras de interferência a partir dos feixes laser projetadas na parede.

Neste ponto, a partir de uma rápida revisão da última aula, passamos para a seguinte seqüência de questões e procedimentos:

- Se a luz apresenta comportamento ondulatório, ela não deveria difratar?
- Qual seria o caminho de um feixe laser após ele ser parcialmente interceptado por um obstáculo? Lembramos que a difração da luz realmente é mais difícil de ser visualizada devido a seu pequeno comprimento de onda e pelo fato de as ondas luminosas serem emitidas aleatoriamente pela maioria das fontes luminosas em situações do cotidiano. Em seguida, apresentamos pequenos obstáculos (cílios postiços, fio de náilon, dentes de um pente), ao invés dos obstáculos de madeira usados na cuba, e pequenas fendas produzidas com um corte de estilete num pedaço de papel escuro, ao invés da fendas usadas na cuba; e ao invés de ondas na água sendo parcialmente interceptadas, usamos feixes laser provenientes de uma caneta.

- Se fizermos um estreito feixe de luz laser ser parcialmente interceptado por estes pequenos obstáculos e passar parcialmente nestas pequenas fendas, será que conseguiremos visualizar um fenômeno de difração? Após ouvirmos as respostas, executamos várias demonstrações de feixes laser passando por esses obstáculos, visualizando várias figuras de difração projetadas na parede, na sala de aula escura.
- Se podemos observar padrões de interferência quando ondas na superfície da água difratam, será que podemos observar o mesmo com a luz? Usamos, mais uma vez, a cuba e mostramos os casos em que podemos observar interferência; e também voltamos a usar os círculos concêntricos impressos em duas lâminas transparentes para retroprojeter.
- Será que podemos repetir essas situações com luz e observar um padrão de interferência? Pedimos para os alunos observarem com atenção a figura de difração projetada no quadro, quando o feixe de luz é interceptado pelo fio de náilon e por duas fendas bem estreitas.
- Observe a faixa de luz projetada no quadro; ela é contínua? Nesse momento, tentamos fazer com que o aluno perceba as franjas de interferência projetadas no quadro.
- Por que essa figura projetada no quadro não é contínua? Esperamos que o aluno consiga associar as franjas observadas com o fato do feixe laser ter sofrido interferência.
- Se a luz difrata e sofre interferência, fenômenos tipicamente ondulatórios, o que podemos dizer sobre o comportamento da luz com relação a esses fenômenos?

23ª aula:

Revisão dos tópicos das aulas sobre difração e interferência, quando repetimos todas as atividades experimentais, as questões propostas e as respostas cientificamente aceitas.

24ª aula:

Aplicação do quarto teste avaliativo (apêndice E).

25ª aula:

Aplicação do pós-teste (apêndice F).

5. METODOLOGIA

A metodologia empregada para a realização deste trabalho segue o que o próprio Vergnaud, de alguma forma, sugere para a pesquisa em campos conceituais.

“...a abordagem canônica ao estudo de um campo conceitual envolve identificar e classificar situações e, então, coletar dados sobre procedimentos e outras maneiras através das quais os estudantes expressam seu raciocínio. Um ciclo de pesquisa inicia com a identificação de níveis de objetos, relações e teoremas-em-ação. O ciclo continua, então com o delineamento de situações e materiais e sua experimentação com alunos, completando-se com a construção de representações simbólicas através da observação e análise dos diferentes fenômenos que ocorrem. Começa, então, um segundo ciclo para melhorar o primeiro e, assim, sucessivamente” (VERGNAUD, 1988 apud MOREIRA, 2002).

As situações propostas aos alunos visam provocar neles mudanças na forma de evolução conceitual; podemos dizer então que os dados coletados com a intervenção foram gerados a partir das situações, caracterizando uma pesquisa com dados criados (LAVILLE e DIONNE, 1999). Para a tomada de dados e aplicação do tratamento foram constituídos dois grupos, sendo um grupo de comparação e um grupo de trabalho: no primeiro foram executadas atividades experimentais interativas e abordagem convencional de ensino; no segundo foram executadas atividades experimentais interativas e propostas de tarefas a serem cumpridas. A proposta inicial era a de dar um caráter de pesquisa com delineamento experimental ao trabalho, mas para isso precisávamos formar esses grupos aleatoriamente (LAVILLE e DIONNE, 1999), o que não foi possível pois, para a formação do grupo de trabalho, foram escolhidas as turmas com maior quantidade de alunos; esse cuidado foi tomado para garantirmos uma quantidade razoável de dados ao final do tratamento. No delineamento experimental trabalha-se com testes já validados, o que não aconteceu no nosso trabalho; as questões aplicadas simplesmente seguiam o critério de serem pertinentes às situações propostas.

5.1. Sobre os sujeitos e local do desenvolvimento do estudo

O estudo foi realizado em uma escola que pertence à rede pública de ensino do Distrito Federal, na cidade satélite de Taguatinga, o Centro Educacional 06, durante o primeiro semestre de 2008, no turno noturno. Os sujeitos submetidos ao tratamento eram alunos da disciplina Física 2 da Educação de Jovens e Adultos, 3º segmento (equivalente ao Ensino Médio). O programa dessa disciplina acompanha o da 2ª série do Ensino Médio, e deve ser cumprido ao longo de um semestre com três horas-aula de 40 minutos cada; algumas turmas tinham aulas duplas. Das cinco turmas, em três as aulas foram conduzidas com atividades experimentais interativas, a partir das quais foram propostas questões. A partir das respostas dos alunos, procurávamos evidenciar indícios de conceitos e teoremas-em-ação, promover evolução conceitual e verificar, então, se é viável promover o ensino de Óptica a partir da teoria ondulatória.

As turmas A, B e C, com um total de 64 alunos que foram até o final do curso, formaram o grupo de trabalho, sendo que destes apenas 16 fizeram todos os testes propostos; esse grupo foi submetido às atividades experimentais interativas e às tarefas na forma de questões. As turmas D e E, com 36 alunos que foram até o final, formaram o grupo de comparação, sendo que destes, apenas 10 fizeram todos os testes; esse grupo foi submetido às mesmas atividades experimentais, mas não às tarefas. Como há um baixo índice de frequência às aulas, poucos conseguiram participar de todas as avaliações.

Muitos alunos que participam da Educação de Jovens e Adultos possuem as seguintes características gerais:

- Estão fora da faixa etária para cursarem o ensino regular;

- Ficaram algum tempo sem frequentar alguma modalidade de ensino antes de ingressar na Educação de Jovens e Adultos;
- Trabalham durante o dia;
- Admitem não terem hábito de estudo fora do horário de aula.

A direção da escola dá aos professores total liberdade para escolherem os métodos de ensino e os critérios de avaliação. Aos docentes são disponibilizados alguns recursos extras: sala de vídeo, retroprojektor e mapas didáticos (cartográficos, do corpo humano, tabela periódica, etc.). Não há na escola laboratórios, nem para atividades experimentais e nem de informática. Com isso, as atividades experimentais do nosso estudo foram executadas na própria sala de aula. Vale lembrar que trabalhamos em um sistema de sala ambiente, ou seja, o professor permanecia e os alunos trocavam de sala em cada mudança de horário. Isso facilitou nosso trabalho pois, nos momentos em que montamos a cuba de ondas, era preciso fazê-lo apenas uma vez para as aulas do turno.

5.2. Sobre o material utilizado

Como a escola não possuía o material necessário para a execução das atividades experimentais, exceto o retroprojektor, utilizamos material de kits para laboratório que já possuíamos; alguns itens não disponíveis foram adquiridos em lojas comerciais. A seguir listamos os mesmos:

- Molas para produção de ondas unidimensionais.

- Bandeja transparente com água que utilizamos como cuba de ondas; essa bandeja foi colocada sobre um retroprojektor a partir do qual projetávamos as frentes de onda na parede.
- Régua para produção de frentes de onda retas na cuba.
- Obstáculos planos de madeira para a interceptarmos as frentes de onda na cuba.
- Superfícies côncavas e convexas em formatos cilíndricos que foram usadas também na cuba.
- Caneta que emitia feixe de laser.
- Espelhos planos.
- Superfícies côncavas e convexas espelhadas em formatos cilíndricos que foram usadas para interceptar o feixe de laser.
- Círculos concêntricos impressos em lâminas para retroprojektor, usados para simularmos instantâneos de frentes de onda circulares (esses círculos podem ser visualizados no anexo A).
- Fendas estreitas, fios de náilon, pentes, cílios postiços, que forneciam os pequenos obstáculos para visualizarmos a difração e interferência do feixe proveniente da caneta laser.

5.3. Sobre as aulas

Nossa hipótese era a de verificar a viabilidade de construir estratégias de ensino de tópicos sobre a luz a partir da sua natureza ondulatória. Optamos, então, por propor as situações a partir de atividades experimentais interativas, através das quais pudéssemos

apresentar conceitos e idéias básicas sobre ondas para, daí, concomitantemente, apresentarmos o comportamento ondulatório da luz. Procuramos executar atividades para as quais o modelo ondulatório fosse necessário para fundamentá-las e que podiam ser facilmente reproduzidas. Para isso, o tratamento inclui os fenômenos da reflexão, interferência e difração, produzidos com ondas em molas *slinky* e na cuba de ondas. Em momentos oportunos, usamos feixes de laser provenientes de uma caneta para reproduzirmos os fenômenos de reflexão, interferência e difração como as ondas na cuba. Optamos por atividades experimentais como ponto de partida porque a nossa prática indica que esse tipo de atividade motiva os alunos. Optamos também por iniciar com ondas formadas em molas e numa cuba com água porque as frentes de ondas seriam facilmente observadas, fornecendo uma estrutura menos abstrata do que aquela das ondas luminosas e ideal para introduzirmos os conceitos básicos sobre ondas.

Iniciamos os trabalhos em sala de aula com a identificação dos conhecimentos prévios. Em um primeiro momento investigamos o que os alunos sabiam sobre movimento ondulatório. Isso foi feito a partir das respostas às seguintes questões: O que a palavra movimento lembra? O que é movimento ondulatório? No espaço entre essas perguntas promovemos uma breve discussão sobre o que foi estudado em Física 1, quando se trabalhou com a cinemática e a dinâmica do ponto material. Em um segundo momento foi aplicado um pré-teste, através do qual também investigamos a existência de conhecimentos prévios sobre luz.

Nas aulas seguintes promovemos as atividades, as quais foram separadas em quatro conjuntos:

Atividades 1 – Conceitos iniciais sobre ondas

Discutimos sobre os princípios e conceitos fundamentais sobre ondas. Usamos ondas produzidas em molas *slinky* (figuras 1 e 2) e em uma cuba de ondas sobre um retroprojektor (figura 3):



Figura 1 – Onda transversal em uma mola.

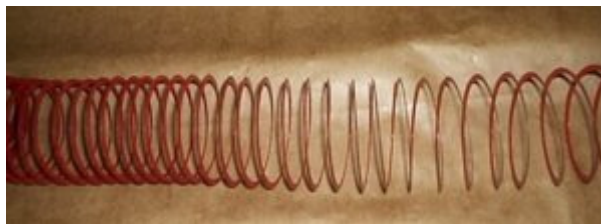


Figura 2 – Onda longitudinal em uma mola.

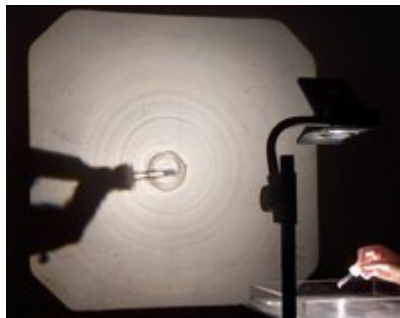


Figura 3 – Onda com frentes circulares na cuba de ondas.
Internet: < davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Ondas>.

Com isso abordamos os seguintes tópicos:

- Conceito de ondas.
- Propriedade fundamental das ondas.
- Classificação de ondas (quanto à direção de propagação, quanto à direção de vibração e quanto à natureza).

- Elementos de ondas periódicas transversais (vales, cristas, amplitude, período, frequência e comprimento de onda).
- A equação fundamental das ondas.

Atividades 2 – Reflexão

Discutimos o fenômeno da reflexão de ondas e a sua similaridade com a reflexão de feixes de luz. Usamos mais uma vez molas *slinky* para apresentar reflexão de ondas unidimensionais, reflexão de ondas com frentes retas e circulares numa cuba de ondas sobre um retroprojektor e reflexão de feixes laser em espelhos planos e curvos. Com isso, abordamos os seguintes tópicos:

- Reflexão de ondas unidimensionais com e sem inversão de fase.
- Reflexão de ondas bidimensionais em superfícies planas produzidas na superfície da água com frentes retas e circulares.
- Conceitos de raios de onda e frentes de ondas.
- Lei da reflexão para os raios de ondas.
- Reflexão de feixes de luz em espelhos curvos e planos.
- Analogia entre as leis da reflexão para os raios de onda e feixes de luz.
- Introdução da idéia do comportamento ondulatório da luz, pela similaridade da reflexão de feixes de luz com raios de onda.

Atividades 3 – Interferência

Discutimos o fenômeno da interferência de ondas, usando mais uma vez molas *slinky* e ondas bidimensionais com frentes circulares produzidas na superfície de certa porção de água na cuba de ondas. Com isso, foram abordados os seguintes tópicos:

- Interferência construtiva e destrutiva de pulsos na mola *slinky*.

- A partir da produção de um padrão de interferência numa cuba de ondas, foi estabelecida uma analogia com a interferência de pulsos na mola *slinky*. Esse padrão foi produzido a partir de duas fontes em fase gerando ondas com frentes circulares.
- As linhas nodais produzidas.
- Para melhor entendimento do padrão de visualização da figura de interferência, usamos a idéia de Filho (1998), quando ele propõe usar círculos concêntricos superpostos para visualizarmos um instantâneo do padrão de interferência de ondas bidimensionais com frentes circulares. Os círculos concêntricos foram desenhados em lâminas transparentes para retroprojeter (figura 4):



Figura 4 – Simulação de um padrão de interferência em lâminas para retroprojeter.
Internet: < davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Ondas>.

Atividades 4 - Difração

Neste último conjunto de atividades, evidenciamos o caráter ondulatório da luz por meio do fenômeno da difração. Usamos a cuba de ondas e feixes de laser.

- Produzimos ondas com frentes retas na cuba de ondas e visualizamos a difração por obstáculos e por fendas (figuras 5, 6 e 7):



Figura 5 – Difração em barreira na cuba de ondas.



Figura 6 – Difração por fenda na cuba de ondas.

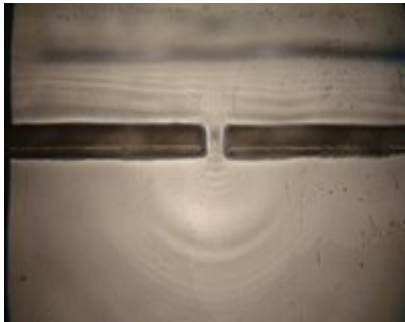


Figura 7 – Difração por uma fenda menor na cuba de ondas.
Internet: < davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Ondas>.

- Visualizamos a difração de ondas com frentes circulares.
- Evidenciamos as fendas se comportando como fontes de ondas com frentes circulares.
- Produzimos ondas com frentes retas difratando em fenda dupla (figura 8):

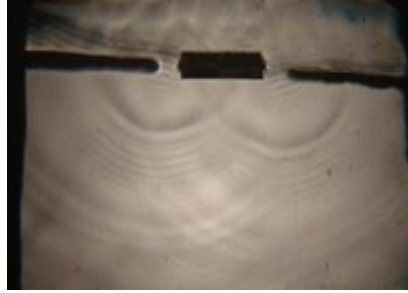


Figura 8 – Difração e interferência por fendas na cuba de ondas.
 Internet: < davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Ondas>.

- Evidenciamos uma figura de interferência na difração por fendas duplas.
- Produzimos ondas com frentes retas difratando por uma fenda simples e posteriormente por fendas duplas.
- Visualizamos feixes de laser difratando em fendas simples (essas fendas foram produzidas cortando com um estilete um papel escuro que foi montado em uma moldura para *slide*).
- Visualizamos feixes de laser difratando em um pente, em um fio de náilon e em cílios postiços, produzindo figuras de interferência projetadas na parede (figura 9):

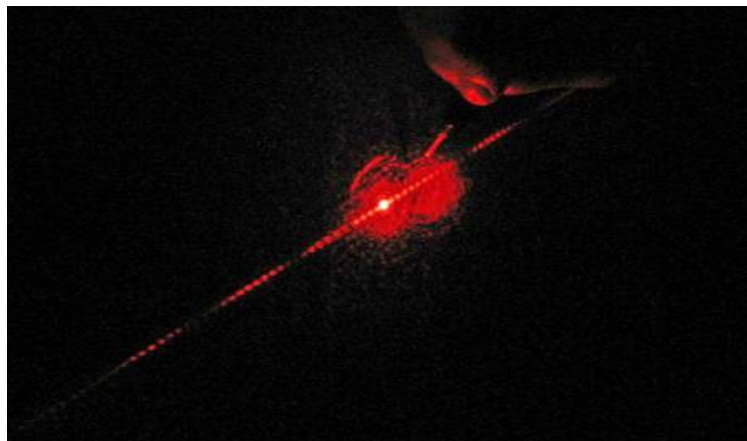


Figura 9 – Padrão de interferência de um feixe de laser.
 Internet: < pessoal.cefetpr.br/msergio/ensino_fisica_Fmod_07_1pr.htm>.

Finalizado cada conjunto de atividades, eram feitas uma breve repetição e a revisão das mesmas. Em seguida, por meio de aulas expositivas, formalizavam-se os conceitos discutidos. Ao final de todo o tratamento, os alunos foram submetidos a um pós-teste.

5.4. Sobre a tomada de dados

Para Vergnaud, o ensino deve facilitar a construção de conceitos e teoremas (conhecimentos-em-ação) explícitos e cientificamente aceitos, a partir do conhecimento implícito. Nesse sentido, se o aprendiz consegue incorporar na sua estrutura cognitiva os conhecimentos cientificamente aceitos, dizemos que houve evolução conceitual, ou aprendizagem significativa, para Ausubel. Porém, essa evolução não se dá de um só golpe, podendo levar anos para ocorrer. Com isso, nossa tomada de dados foi guiada com o intuito de averiguar se nosso tratamento promoveu alguma evolução conceitual, ou seja, se os alunos desenvolveram teoremas e conceitos-em-ação cientificamente aceitos. Para termos esses dados registrados, as aulas no grupo de trabalho foram gravadas em áudio nos momentos em que trabalhávamos as atividades experimentais e as situações na forma de perguntas. Além disso, após cada conjunto de atividades, os alunos eram submetidos a um teste avaliativo versando sobre essas situações. Os alunos da turma de comparação foram submetidos aos mesmos testes.

5.5. Sobre os testes

Em nenhum momento foi dito aos alunos sobre os nossos reais objetivos com as atividades experimentais e com as situações propostas; queríamos que tudo se passasse como uma situação corriqueira de sala de aula. Com isso, não foi revelado os termos pré-teste, pós-teste e teste; todos foram chamados de avaliações.

Com os testes, queríamos identificar evidências de evolução conceitual a partir das situações trabalhadas durante as aulas; por isso, as questões foram baseadas nessas situações. Com o pré-teste, queríamos identificar conhecimentos prévios, considerados por nós relevantes, para o tratamento. O pós-teste foi elaborado a partir do pré-teste e incluímos questões gerais sobre as situações tratadas durante as aulas; queríamos avaliar o impacto final do tratamento nos alunos.

A data de aplicação de cada teste era previamente divulgada e sempre orientávamos os alunos a escreverem o que eles sabiam, usando suas próprias palavras, sem se preocupar com a nota. Todos os testes, com exceção do pré-teste, foram corrigidos e as notas divulgadas; orientávamos aqueles com notas baixas a tirarem nota melhor na próxima etapa avaliativa, que já seria considerado como uma recuperação. A duração de cada teste era de duas aulas (80 minutos).

6. ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO

Para Vergnaud a aquisição de novos conhecimentos é moldada pelos conhecimentos previamente dominados. Para Ausubel, na aprendizagem significativa o conhecimento prévio é o ponto de partida para o novo conhecimento, e é preciso identificar sobre quais conhecimentos prévios os estudantes podem se apoiar para aprender. Com isso, na primeira aula procuramos identificar esses conhecimentos a partir de uma discussão motivada por duas perguntas: O que a palavra movimento lembra? O que é movimento ondulatório? As respostas foram registradas em um caderno de acompanhamento das aulas, chamado diário de bordo. Na aula seguinte, esse processo de identificação seguiu com a aplicação de um pré-teste com questões tratando sobre o conhecimento prévio que entendíamos imprescindível (os subsunçores) para a aprendizagem do novo conhecimento.

Nas aulas seguintes, durante o desenvolvimento do projeto, foram aplicados quatro testes avaliativos. Na última aula foi aplicado um pós-teste. Além disso, gravamos em áudio os momentos em que trabalhávamos com as situações propostas. O objetivo desse procedimento foi o de buscar evidências de uma maior evolução conceitual no grupo de trabalho do que no grupo de comparação, na forma de evidências na explicitação de teoremas e conceitos-em-ação mais próximos do conhecimento cientificamente aceito, confirmando, assim, a efetividade de se iniciar um curso de Óptica a partir da teoria ondulatória.

Somente 16 alunos do grupo de trabalho e 10 do grupo de comparação participaram de todos os testes (constam nos apêndices A, B, C, D, E e F); somente esses foram considerados para apresentação e análise de dados.

Segundo Moreira (2002), os conhecimentos-em-ação podem ser precursores na aquisição de conceitos científicos e por isso devem ser pesquisados. Com isso, a identificação desses conhecimentos guiou nossa análise de dados.

6.1. Identificação dos conhecimentos prévios relevantes

Partindo do princípio que os alunos matriculados em Física 2 já tiveram contato com o conteúdo curricular de Física 1, quando se estudou a cinemática e a dinâmica do ponto material, procuramos, na primeira aula, identificar as idéias gerais que os estudantes apresentavam sobre o assunto estudado em Física 1 e, paulatinamente, introduzir a idéia de movimento ondulatório para, então, avançarmos para o comportamento ondulatório da luz.

Os corpos se movem! O que a palavra movimento lembra?

Para efeito de simplificação, foi pedido aos alunos considerarem os corpos como pontos materiais. As respostas eram anotadas no quadro. Tanto no grupo de trabalho como no de comparação as respostas relevantes se equipararam. As respostas mais freqüentes eram aquelas que associavam movimento com deslocamento e aquelas sobre a necessidade de forças para dar início ao movimento; normalmente usavam a palavra impulso para denominar força. Pouquíssimos alunos citavam a velocidade e aceleração como grandezas pertinentes ao movimento dos corpos, e poucos lembraram que um corpo se move quando sua posição muda em relação a um referencial.

O que é movimento ondulatório?

Mais uma vez as resposta se equipararam nos dois grupos. Basicamente os alunos respondiam a essa questão a partir de exemplos em que se observam fenômenos ondulatórios:

ondas no mar, o som se propaga na forma de ondas, ondas se propagando em uma corda, terremotos, ondas de estações de rádio.

Percebemos nessa discussão que basicamente os alunos associavam movimento com força e deslocamento, mas não apresentaram a idéia básica para se produzir ondas a partir de algo vibrando.

6.2. O pré-teste e o pós-teste

Na tabela 1 a seguir apresentamos um resumo das respostas esperadas e as respostas apresentadas pelos alunos da turma de trabalho no pré-teste.

Tabela 1 – Resultados da turma de trabalho no pré-teste.

Questões	Respostas esperadas	Tipos de respostas apresentadas pelos alunos	Grupo de trabalho (N = 16)
1	Quando sua posição muda em relação a um referencial.	Resposta certa.	2
		Quando se desloca de um local para outro.	10
		Quando é atingido por uma força.	2
		Quando acelera ou desacelera.	1
		Quando está interagindo.	1
2	Mudança do valor da velocidade (aceleração ou desaceleração) e/ou da sua direção (o corpo executa um movimento curvilíneo).	Citou pelo menos uma das alterações esperadas.	10
		Não citou alterações, apenas confirmou que elas podem acontecer.	4
		Respondeu apenas que a alteração depende de como age a força.	1
		Citou a velocidade como uma alteração.	1
3	Algo executando movimentos oscilatórios.	Resposta certa.	4
		Citou a necessidade de a corda ser movimentada, mas não evidenciou que deve ser de maneira oscilatória.	6
		Respondeu que deve estar presente uma força.	6

4	Executa movimentos oscilatórios.	Resposta certa.	6
		Respondeu que o ponto se movimenta, mas não evidenciou o seu caráter oscilatório.	10
5	Não esperávamos nenhum tipo de resposta em especial. Pretendíamos apenas sondar sobre o que os alunos pensavam sobre luz.	Algo que ilumina e/ou aquece.	5
		É uma forma de energia.	4
		É um tipo de raio que se propaga e ilumina.	2
		Energia emitida em forma de ondas.	1
		É algo emitido por corpos muito quentes em forma de ondas.	1
		Só citou que luz é algo importante para o dia-a-dia.	3
6	Pretendíamos apenas saber como os alunos representariam a luz saindo de uma lâmpada em um desenho.	Representou a luz com raios, mas não indicou o sentido nos mesmos.	12
		Esboçou uma representação por meio de ondas.	1
		Traçou uma linha fechada em volta da lâmpada.	1
		Desenhou várias linhas curvas partindo da lâmpada.	1
		Sem resposta.	1
7	Queríamos apenas conhecer quais os fenômenos os alunos identificam estarem relacionados com a luz.	Citou pelo menos um dos seguintes fenômenos: calor, relâmpagos, descargas elétricas, a iluminação do Sol e/ou do fogo, raios emitidos por fontes luminosas.	11
		Citou apenas corpos: Sol, estrelas, velas, Lua.	2
		Só citou que a luz é algo presente em nossas vidas.	3
8	Pretendíamos obter evidências sobre se o aluno já tinha algum conhecimento sobre o comportamento ondulatório da luz.	Respondeu que sim.	12
		Respondeu que não.	4

As respostas relevantes obtidas nas questões 1, 2, 3 e 4, basicamente confirmaram o que já tínhamos obtido nas discussões da primeira aula. Em geral os alunos associaram movimento com mudança de posição, perceberam que ele pode ser alterado e quais alterações possíveis. Confirmaram a necessidade de termos algo interagindo com uma corda para termos nela um movimento ondulatório, mas tiveram dificuldades de identificar o caráter oscilatório dessa interação e do movimento ondulatório.

Nas questões 5, 6, 7 e 8, nossa intenção era a de identificar o conhecimento prévio sobre luz. Notamos, na maior parte das respostas, uma forte concepção da luz como energia. Percebemos outra forte concepção: a representação da luz saindo de uma lâmpada com segmentos de retas, mas em nenhum caso foi representado o sentido de propagação. Na questão 8, a maioria dos estudantes respondeu que há alguma relação entre ondas e luz; as justificativas mais relevantes indicavam que ondas e luz são entes que se espalham quando produzidos e que, por isso, deveria haver alguma relação entre elas.

Notando então que em geral os estudantes já possuíam a idéia de como produzir um movimento e que já conheciam exemplos de fenômenos ondulatórios, nas aulas seguintes procuramos ancorar nessas idéias a produção de um movimento oscilatório como causa de um movimento ondulatório. Percebendo também que as duas concepções básicas sobre a luz eram a energética e a representação geométrica por meio de raios, e que os estudantes já acreditavam haver alguma relação entre ondas e luz, procuramos ancorar nessas idéias, o comportamento ondulatório da luz como mais uma alternativa.

Na tabela 2 a seguir apresentamos os resultados obtidos na turma de trabalho no pós-teste, com as respostas esperadas e um resumo das respostas obtidas.

Tabela 2 – Resultados da turma de trabalho no pós-teste.

Questões	Respostas esperadas	Tipos de respostas apresentadas pelos alunos	Grupo de trabalho (N = 16)
1	Provocando movimentos oscilatórios na extremidade da mola.	Resposta certa.	10
		Citou a necessidade de a corda ser movimentada, mas não evidenciou que deve ser de maneira oscilatória.	4
		Por meio de uma força.	2
2	O ponto executa movimentos oscilatórios.	Resposta certa.	10
		Respondeu que o ponto se movimenta, mas não evidenciou o seu caráter oscilatório.	5
		Respondeu que o ponto não se movimenta.	1

3	Fenômeno que ocorre quando uma onda encontra um obstáculo e retorna para o meio em que estava se propagando.	Resposta certa.	8
		Respondeu que a reflexão da onda ocorre quando ela encontra um obstáculo.	4
		Respondeu apenas que ocorre quando a onda retorna.	1
		Respondeu que é o fenômeno que ocorre quando duas ondas se encontram.	1
		Respondeu que é o fenômeno que ocorre quando uma onda se espalha.	1
		Sem resposta.	1
4	Fenômeno que ocorre quando duas ou mais ondas ocupam um determinado espaço ao mesmo tempo e se superpõem de maneira construtiva ou destrutiva.	Resposta certa.	8
		Apenas respondeu que ocorre quando ondas se encontram.	4
		Fez referência apenas à interferência construtiva e destrutiva.	1
		Respondeu que é o fenômeno que ocorre quando uma onda não ultrapassa um obstáculo.	1
		Respondeu que é o fenômeno que ocorre quando uma onda atravessa uma fenda.	1
		Sem resposta.	1
5	É a propriedade que uma onda apresenta de contornar um obstáculo ao ser parcialmente interceptada por ele.	Resposta certa.	0
		Respondeu que é a propriedade apresentada por uma onda ao contornar um obstáculo, mas não cita que ela é parcialmente interceptada por ele.	8
		Respondeu que é um fenômeno que ocorre com uma onda quando ela é interceptada por um obstáculo.	3
		Respondeu que uma propriedade apresentada por uma onda quando ela cruza outra onda.	3
		Só citou que é um fenômeno que ocorre quando as ondas se propagam.	2
6	Nesta questão queríamos evidenciar como o aluno passou a representar a luz emitida por uma lâmpada após as aulas.	Representou a luz com raios, indicando o sentido nos mesmos.	1
		Representou a luz com raios, mas não indicou o sentido nos mesmos.	10
		Traçou uma ou mais linhas fechadas em volta da lâmpada e raios sem indicar o sentido nos mesmos.	2
		Esboçou uma representação por meio de várias ondas transversais.	1
		Traçou uma ou mais linhas fechadas em volta da lâmpada.	2

7	Pretendíamos avaliar como o aluno compreendeu o modelo ondulatório da luz.	Sim, porque luz e ondas possuem o mesmo comportamento.	10
		Sim, justificando que ondas e luz apresentam o mesmo comportamento para pelo menos um dos seguintes fenômenos: reflexão, interferência ou difração.	6

As questões 3, 4, 6 e 8 do pré-teste equivalem basicamente às questões 1, 2, 6 e 7 do pós-teste, respectivamente. Comparando as respostas obtidas, podemos chegar às seguintes conclusões:

- De quatro alunos (25,00%) que perceberam a necessidade de termos algo em movimento oscilatório para produção de ondas numa corda, essa quantidade passa para dez (62,50%) no pós-teste;
- De seis alunos (37,50%) que perceberam que um ponto numa corda (ou mola) durante a passagem de uma onda executa movimento oscilatório, essa quantidade passa para dez (62,50%) no pós-teste.
- De doze alunos (75,00%) que representaram a luz saindo da lâmpada com segmentos de reta, essa quantidade passa para treze (81,25%) no pós-teste, com pequenas diferenças: todas as respostas no primeiro caso não indicavam o sentido de propagação; no segundo caso, apenas em uma resposta foi indicado o sentido de propagação e em dois casos foram também traçadas uma ou mais linhas fechadas em volta da lâmpada.
- Observamos que de doze alunos (75,00%) que achavam haver alguma relação entre ondas e luz, com justificativas pouco consistentes, essa quantidade passa para dezesseis (100,00%) no pós-testes com justificativas mais consistentes.

Com esses dados temos indícios de uma evolução conceitual pois, dos conceitos iniciais apresentados sobre produção, propagação de ondas e a relação entre ondas e luz, os alunos, em geral, apresentaram conceitos mais próximos do que é cientificamente aceito no pós-teste.

Porém, percebemos que não houve evolução conceitual significativa sobre a representação da luz saindo da lâmpada, pois os alunos apresentaram basicamente as mesmas representações antes e depois, e acreditamos que uma representação considerada correta seria aquela com segmentos de reta orientados. Talvez isso fosse devido à ênfase ao tratamento ondulatório durante as aulas, apesar de termos utilizado em alguns momentos o modelo de raios.

Nas questões 3, 4 e 5 do pós-teste queríamos avaliar o que os estudantes conseguiram reter sobre os conceitos de reflexão, interferência e difração, que foram trabalhados durante as aulas. Analisando as respostas percebemos:

- Na questão 3 houve oito respostas (50,00%) consideradas corretas sobre o fenômeno da reflexão, quatro (25,00%) indicando apenas que a reflexão ocorre quando a onda encontra um obstáculo e uma (6,25%) alegando que ocorre apenas quando a onda retorna; as outras respostas não foram consideradas corretas. Temos então um total de treze respostas (81,25%) consideradas aceitáveis para o que era esperado.
- Na questão 4, oito respostas (50,00%) aceitáveis sobre o fenômeno da interferência, quatro (25,00%) indicando apenas que um fenômeno que ocorre quando ondas se encontram e uma (6,25%) fazendo apenas referência à interferência construtiva e destrutiva; as outras respostas não eram corretas. Temos então um total de treze respostas (81,25%) corretas ou bem próximas do que era esperado.
- Na questão 5 não tivemos respostas totalmente corretas; oito (50,00%) parcialmente corretas quando esses estudantes reconhecem que na difração a onda contorna um obstáculo, mas não citam que ela é parcialmente interceptada por ele, três respostas (18,75%) parcialmente corretas quando citam apenas que a difração ocorre quando uma onda é interceptada por um obstáculo. Temos então um total de 68,75% de respostas muito próximas do que era esperado.

Esses dados sugerem que boa parte dos estudantes conseguiu reter muitos aspectos pertinentes à reflexão, interferência e difração. Porém, não logramos êxito em fazer o aluno explicitar, na sua resposta, que a onda deve ser parcialmente interceptada por um obstáculo para que haja difração, apesar de termos dado ênfase a esse aspecto durante as aulas. Acreditamos que poderíamos ter trabalhado melhor essa idéia, comparando a diferença de uma onda totalmente com uma parcialmente interceptada.

6.3. Teste 1 – Conceitos iniciais sobre ondas

Na tabela 3 a seguir apresentamos um resumo das respostas esperadas e as respostas obtidas dos alunos da turma de trabalho no primeiro teste. As questões dos testes tratavam das situações trabalhadas durante as aulas.

Tabela 3 – Resultados da turma de trabalho no primeiro teste.

Questões	Respostas esperadas	Tipos de respostas apresentadas pelos alunos	Grupo de trabalho (N = 16)
1.a	Para cima e para baixo.	Resposta certa.	14
		Deve se movimentar verticalmente.	2
1.b	Para cima e para baixo.	Resposta certa.	11
		Deve se movimentar transversalmente.	2
		Deve permanecer imóvel.	2
		Questão deixada sem resposta.	1
2	Não, porque elas não se propagam apenas ao longo de uma linha, e sim em uma superfície.	Resposta certa.	8
		Não, com justificativa inconsistente.	1
		Sim, com justificativa inconsistente.	7
3.a	Desenho de uma senóide para uma oscilação completa.	Desenho correto.	6
		Desenho de uma senóide não correspondendo perfeitamente a uma oscilação completa.	8
		Desenho de uma senóide correspondendo a duas ou mais oscilações completas.	2

3.b	Nome: comprimento de onda. Símbolo: λ .	Resposta correta.	3
		Nome: lambda. Símbolo: λ .	9
		Nome: outros. Símbolo: λ .	4
3.c	Pela definição de frequência como sendo a quantidade de oscilações pelo tempo gasto em executá-las, concluir por meio de um cálculo que a resposta é 2 Hz.	Cálculo correto.	13
		Cálculo correto, porém não expressou corretamente a resposta em hertz ou oscilações/segundo.	3
3.d	Nome: frequência. Símbolo: f.	Resposta correta.	1
		Nome: frequência. Símbolo: Hz.	1
		Nome: hertz. Símbolo: Hz.	2
		Nome: período. Símbolo: f.	1
		Nome: período. Símbolo: T.	2
		Só indicou o símbolo: Hz.	4
		Indicou dois símbolos: f e T.	2
		Questão deixada sem resposta.	3
3.e	Usar o valor da frequência já obtido na questão anterior e a partir dele calcular o período.	Cálculo correto.	6
		Cálculo correto, porém não expressou a resposta com a unidade correta.	2
		Calculou novamente a frequência.	2
		Cálculo sem significado físico.	3
		Sem resposta.	3
3.f	Nome: período. Símbolo: T.	Resposta correta.	6
		Só indicou o símbolo: T.	2
		Só indicou o símbolo: λ .	2
		Só indicou o símbolo: Hz.	1
		Nome: hertz. Símbolo: Hz.	2
		Nome: lambda. Símbolo: f.	1
		Sem resposta.	2
4	Calcular o valor da velocidade dividindo a distância percorrida pelo tempo gasto em percorrê-la.	Cálculo correto.	9
		Calculou corretamente, mas não expressou a resposta em metros por segundo.	1
		Calculou o valor da velocidade multiplicando a distância com o tempo.	2
		Calculou o valor da velocidade dividindo o tempo pela distância percorrida.	3
		Questão deixada sem resposta.	1

5	Propor a equação fundamental das ondas a partir da expressão que fornece o valor da velocidade de um móvel em movimento uniforme.	Resposta correta.	1
		Propôs a equação fundamental das ondas sem nenhuma explicação.	6
		Propôs apenas a expressão que fornece o valor da velocidade de um móvel em movimento uniforme.	1
		Propôs uma expressão sem significado físico.	6
		Questão deixada sem resposta.	2

Analisando as respostas obtidas nesse teste, acreditamos ter identificado o seguinte conceito-em-ação na questão 3.a: a *senóide* como uma representação geométrica viável para uma onda transversal periódica produzida na corda. Porém, só em algumas respostas (37,50%) a representação foi feita exatamente para uma oscilação completa.

Na questão 3.b Todos reconheceram a letra grega “ λ ” como símbolo para a distância que a onda percorre em uma oscilação completa, mas apenas 18,75% dos alunos nomearam corretamente essa grandeza como comprimento de onda; 56,25% atribuíram o nome da própria letra (lambda).

Na questão 3.d apenas um estudante (6,25%) respondeu corretamente o nome e o símbolo usado durante as aulas para a grandeza que expressa a quantidade de oscilações pela unidade de tempo (frequência); 43,75% dos alunos atribuíram o símbolo da unidade de medida (Hz) como sendo o símbolo da grandeza.

Na questão 3.f apenas 37,50% das respostas indicaram corretamente o nome e o símbolo da grandeza que expressa o tempo gasto em uma oscilação completa (período); mais duas respostas (12,50%) indicaram corretamente apenas o símbolo.

Nessas questões, basicamente queríamos avaliar se os alunos conseguiam nomear corretamente as grandezas e suas unidades pertinentes às situações trabalhadas durante as primeiras aulas. A minoria apresentou respostas corretas a essas questões, porém relacionados às situações propostas, como por exemplo, nomear de hertz, ao invés de frequência, o nome

da grandeza que expressa a quantidade de oscilações pela unidade de tempo. Com isso, para melhor análise, montamos o gráfico comparativo apresentado na figura 10 a seguir, onde apresentamos o percentual de respostas consideradas corretas, parcialmente corretas, incorretas e sem resposta.

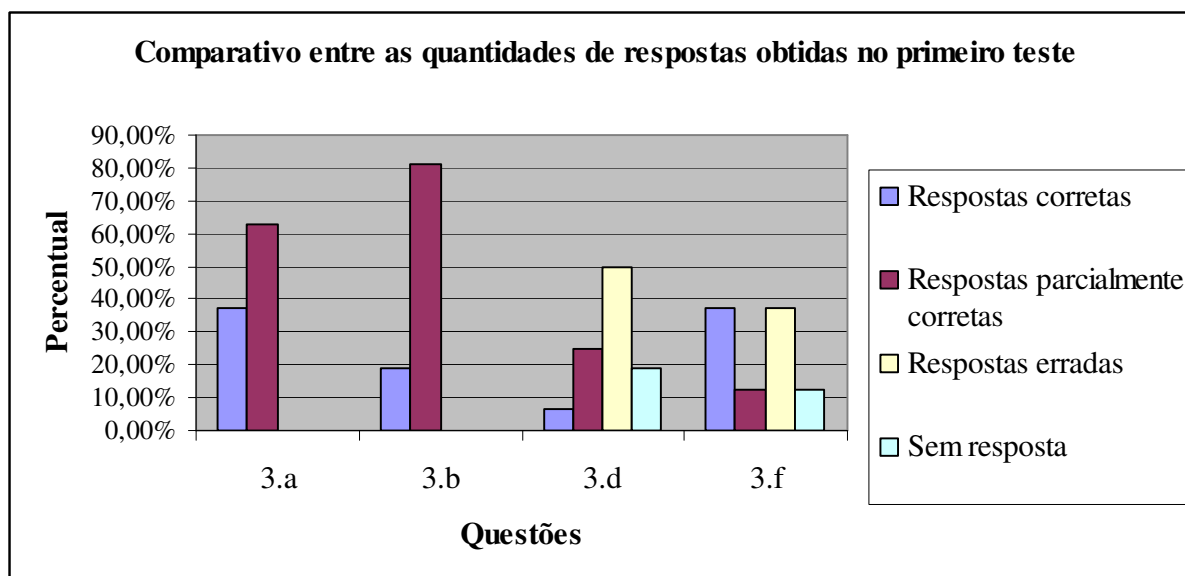


Figura 10 – Gráfico comparativo entre as quantidades de respostas no primeiro teste.

Constatamos então que as situações trabalhadas não foram suficientes para termos respostas corretas na maioria desses casos, mas foram suficientes para implementar conceitos pertencentes a essas situações, como se percebe na maioria das respostas. Como é previsto na teoria dos campos conceituais, nem sempre a situação proposta provoca a evolução conceitual esperada de um só golpe. Teríamos, então, que trabalhar mais casos onde pudéssemos comparar as grandezas básicas envolvidas (período, frequência e comprimento de onda) com seus símbolos e as respectivas unidades e começar um novo ciclo de trabalho, procurando aperfeiçoar o ciclo anterior.

Acreditamos ter identificado os seguintes em teoremas-em-ação:

- Questão 1.a: devemos movimentar a extremidade de uma mola para cima para baixo para produzirmos nela uma onda (87,50%); devemos movimentá-la verticalmente (12,50%).

- Questão 1.b: um ponto de uma mola se movimenta para cima e para baixo durante a passagem de uma onda transversal (68,75%); movimenta-se transversalmente (12,50%).
- Questão 2: as ondas que se propagam na superfície da água não são unidimensionais porque elas não se propagam apenas ao longo de uma linha (50,00%); não são unidimensionais com justificativa inconsistente (6,25%).
- Questão 3.c: a quantidade de oscilações que minha mão executa em 1 segundo, em movimento repetitivo e regular, para gerar uma onda transversal na mola, pode ser determinada dividindo a quantidade total de oscilações pelo tempo gasto em executá-las (81,25% com unidade correta na resposta e 18,75% com unidade incorreta).
- Questão 3.e: o tempo gasto para minha mão executar uma oscilação completa pode ser determinado dividindo 1 pelo período (37,50% com unidade correta na resposta e 12,50% com unidade incorreta).
- Questão 4: o valor da velocidade de onda pode se calculado dividindo a distância percorrida pelo tempo gasto em percorrê-la (56,25% com unidade correta na resposta e 6,25% com unidade incorreta).
- Questão 5: a equação fundamental das ondas pode ser obtida a partir da expressão que fornece o valor da velocidade de um móvel em movimento uniforme (6,25%); apenas a equação fundamental das ondas é apresentada (37,50%); apenas a expressão que fornece o valor da velocidade de um móvel em movimento uniforme é apresentada (6,25%).

Com base no que foi obtido no primeiro teste, e para melhor comparação, construímos o gráfico entre os percentuais dos teoremas-em-ação considerados condizentes com o que é cientificamente aceito e os outros que eram incorretos ou parcialmente incorretos, apresentados na figura 11:

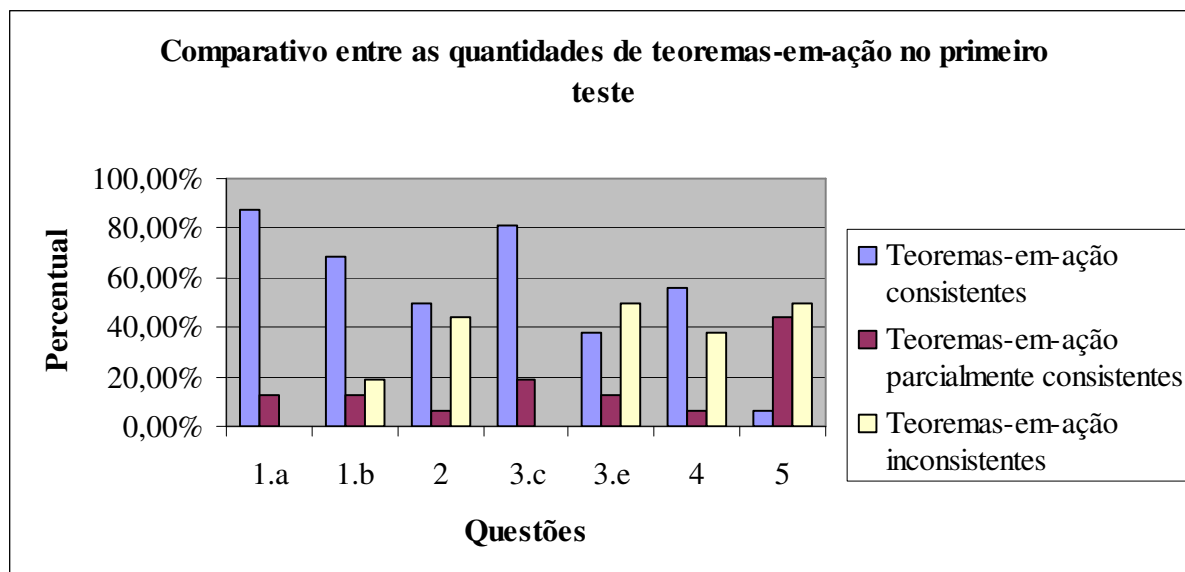


Figura 11 – Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no primeiro teste.

Com base nesse gráfico, podemos notar que em cada questão, mais da metade da turma de trabalho conseguiu expressar teoremas-em-ação consistentes, ou parcialmente consistentes com o que era esperado. Isso tudo nos leva a crer que as aulas funcionaram efetivamente nos moldes das situações, tal como preconiza a teoria dos campos conceituais.

6.4. Teste 2 – Reflexão

Na tabela 4 a seguir apresentamos um resumo das respostas esperadas e das respostas obtidas dos alunos da turma de trabalho no segundo teste. Vale lembrar que foram nessas aulas que começamos a introduzir as idéias sobre o comportamento ondulatório da luz.

Tabela 4 – Resultados da turma de trabalho no segundo teste.

Questões	Respostas esperadas	Tipos de respostas apresentadas pelos alunos	Grupo de trabalho (N = 16)
1.a	Desenhar um segmento de reta orientado para o obstáculo e perpendicular às frentes de onda.	Resposta correta.	12
		Desenhou o raio de onda com orientação oposta à correta.	1
		Desenhou a onda refletida com duas frentes e um raio de onda.	2
		Desenhou uma onda incidente com frentes paralelas ao obstáculo com dois raios de onda.	1
1.b	Desenhar, coerentemente com as leis da reflexão, um ou mais raios de onda refletidos, com pelo menos duas frentes de onda.	Resposta correta.	9
		Desenhou as frentes de onda corretamente, porém com o raio de onda com orientação oposta à correta.	1
		Desenhou corretamente o raio de onda, porém com frentes paralelas ao obstáculo.	1
		Desenhou frentes incidentes e refletidas paralelas ao obstáculo, com os respectivos raios de onda.	2
		Desenhou frentes de onda do outro lado do obstáculo.	1
		Desenhou apenas frentes incidentes paralelas ao obstáculo com dois raios de onda.	1
		Desenhou frentes incidentes e paralelas ao obstáculo sem raios de onda.	1
1.c	Desenhar, coerentemente com as leis da reflexão, o raio de onda incidente, a reta normal e o raio refletido, indicando os ângulos de incidência e reflexão.	Resposta correta.	11
		Desenhou o raio refletido com sentido oposto ao correto.	1
		Desenhou o raio incidente com sentido oposto ao correto.	1
		Desenhou o raio incidente e refletido perpendiculares ao obstáculo.	2
		Sem resposta.	1
1.d	$i = r$.	Resposta correta.	12
		$i > r$.	1
		$i < r$.	2
		Sem resposta.	1

2.a	Desenhar dois segmentos de reta orientados para os obstáculos e perpendiculares às frentes de onda: uma acima e outro abaixo da linha pontilhada.	Resposta correta.	8
		Desenhou o raio de onda com orientação oposta à correta.	4
		Desenhou frentes de onda do outro lado do obstáculo.	1
		Desenhou raios não perpendiculares às frentes.	2
		Sem resposta.	1
2.b	Desenhar, coerentemente com as leis da reflexão, raios de onda convergentes no primeiro caso e divergentes no segundo caso, com as respectivas frentes de ondas circulares.	Resposta certa.	5
		Desenhou apenas os raios refletidos.	4
		Desenhou apenas os raios refletidos, mas convergido para ambos os casos.	1
		Desenhou apenas os raios refletidos, mas com a mesma direção dos raios incidentes.	3
		Desenhou apenas as frentes refletidas, porém trocou as respostas.	1
		Desenhou frentes incidentes e não representou os raios de onda.	1
		Sem resposta.	1
3	A luz apresenta comportamento ondulatório ao sofrer reflexão.	Resposta certa.	9
		Faz referência à reflexão da luz, mas não cita o seu caráter ondulatório.	6
		Sem resposta.	1

Analisando as respostas tabeladas, acreditamos ter identificado os seguintes conceitos-em-ação:

- Questão 1.a: em todas as respostas está presente pelo menos um raio de onda; em 75,00% dos casos ele foi posicionado corretamente; uma resposta (6,25%) foi considerada parcialmente correta.
- Questão 1.b: 56,25% dos alunos conseguiram posicionar coerentemente com as leis da reflexão as frentes de onda refletidas e o respectivo raio de onda; duas respostas (12,50%) foram consideradas parcialmente corretas.
- Questão 1.c: nessa questão, em 68,75% das respostas os estudantes representaram corretamente para a situação proposta o ângulo de incidência, o ângulo de reflexão, o raio

incidente, o raio refletido e a reta normal; quatro respostas (25,00%) foram consideradas parcialmente corretas.

- Questão 2.a: nessa nova situação queríamos verificar como o aluno representava os raios de onda; em oito respostas (50,00%) houve representação correta; em seis respostas (37,50%) os raios eram apresentados, mas não eram representados com a direção ou com os sentidos corretos, sendo consideradas respostas parcialmente corretas.

Com isso, montamos o gráfico comparativo apresentado na figura 12 a seguir, onde apresentamos o percentual de respostas consistentes, parcialmente consistentes e aquelas com respostas inconsistentes ou deixadas em branco.

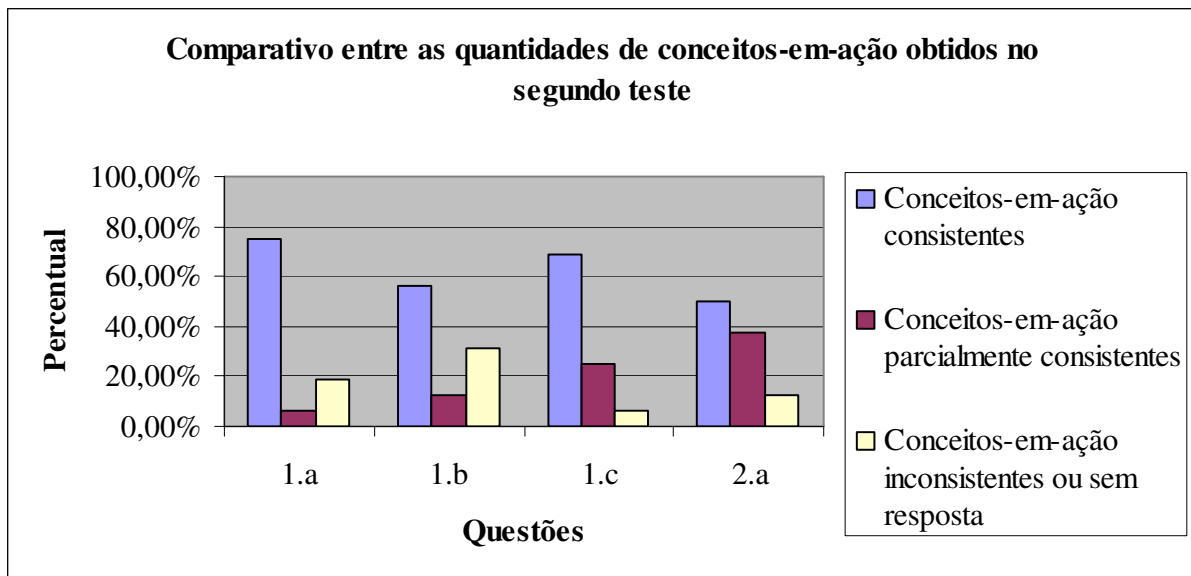


Figura 12 – Gráfico comparativo entre os conceitos-em-ação no segundo teste.

A seguir destacamos os teoremas-em-ação consistentes com o que era esperado e os parcialmente consistentes, respectivamente, do segundo teste:

- Questão 1.d: o ângulo de incidência (i) e o ângulo de reflexão (r) têm medidas iguais (75,00%); esses ângulos não têm medidas iguais (18,75%).

- Questão 2.b: frentes de ondas retas se propagando na superfície da água, ao incidirem em uma superfície côncava, convergem ao sofrerem reflexão, e divergem se a superfície for convexa (56,25%); essas frentes de ondas convergem para essas duas superfícies (6,25%).
- Questão 3: a luz apresenta comportamento ondulatório ao sofrer reflexão (56,25%); a luz é algo que sofre reflexão (37,50%).

Com isso, montamos o gráfico comparativo a seguir (figura 13) entre os teoremas-em-ação destacados do segundo teste.

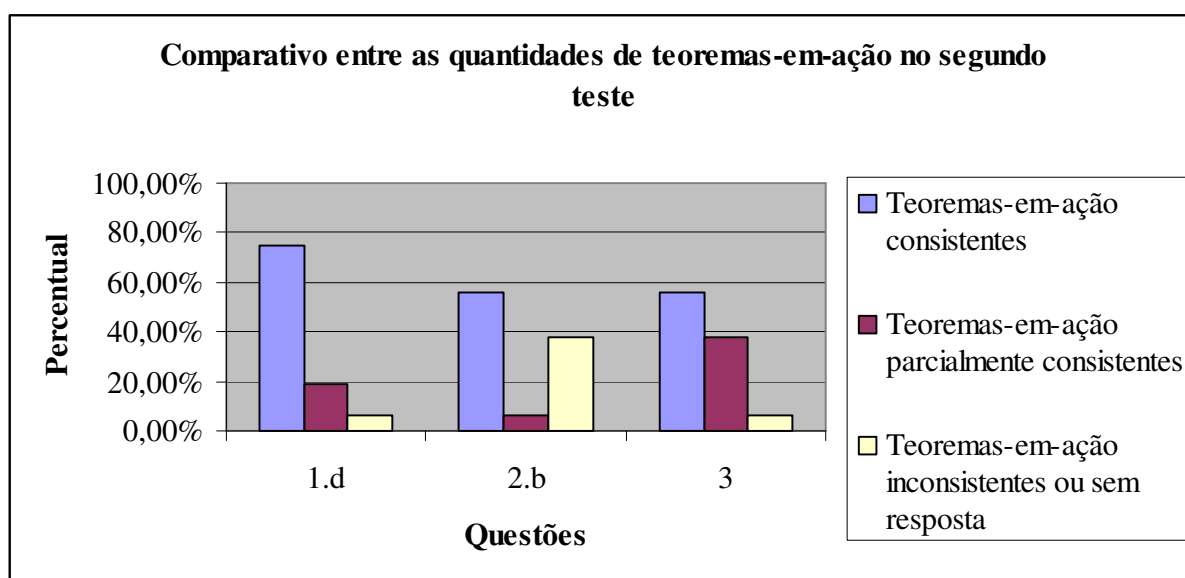


Figura 13 – Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no segundo teste.

Observando os conhecimentos-em-ação (conceitos e teoremas-em-ação) apresentados nesses dois últimos gráficos, constatamos que as respostas consistentes foram maioria em todas as questões analisadas, que nos leva a crer na eficácia das situações propostas.

Observamos também, em todas as questões, respostas parcialmente consistentes, evidenciando alunos que poderiam apresentar maior evolução conceitual, se estiverem predispostos a isso e se fossem submetidos a um novo conjunto de situações pertinentes a esse conteúdo.

6.5. Teste 3 – Interferência

A seguir é apresentada a tabela 5 com o resumo dos resultados esperados e obtidos no terceiro teste.

Tabela 5 – Resultados da turma de trabalho no terceiro teste.

Questões	Respostas esperadas	Tipos de respostas apresentadas pelos alunos	Grupo de trabalho (N = 16)
1.a	Não, esses pulsos se superpõem produzido um fenômeno de interferência.	Resposta correta com a justificativa esperada.	3
		Resposta correta justificando que os pulsos se encontram e prosseguem seus movimentos ao longo da mola.	4
		Faz apenas referência à interferência.	1
		Responde que sim, fazendo referência à interferência e lembra que os pulsos prosseguem seus movimentos ao longo da mola.	3
		Responde que sim, fazendo referência à interferência.	2
		Responde que sim, justificando que os pulsos realmente sofrem reflexão ao se encontrarem.	3
1.b	Desenhar a perturbação resultante como sendo a soma algébrica das perturbações que seriam produzidas isoladamente, e desenhar os pulsos após o cruzamento com a mesma forma que tinham antes.	Resposta correta.	12
		Só não traçou o pulso da interferência construtiva com o formato esperado, representado o mesmo com o mesmo formato dos pulsos separados.	1
		Não representou os pulsos após o cruzamento.	1
		Representou corretamente apenas a interferência construtiva.	1
		Trocou as formas de interferência.	1
2.a	Produzir na mesma superfície outra onda com frentes circulares em fase com a primeira onda, ou seja, emitindo uma crista ou vale no mesmo instante.	Resposta certa.	5
		Citou a necessidade de se produzir outra onda com frentes circulares, mas não citou que ela deve estar em fase com a primeira onda.	7
		Respondeu que deve haver outra onda, mas não explicou como produzi-la.	2
		Sem resposta.	2

2.b	Marcar com pequenos círculos cheios quatro pontos onde há encontro de crista com crista ou vale com vale; marcar com pequenos círculos vazios quatro pontos onde há encontro de crista com vale.	Resposta certa.	7
		Marcou corretamente pontos de interferência construtiva, porém marcou pontos de interferência construtiva como destrutiva.	8
		Sem resposta.	1
2.c	Continuam a se propagar como se não houvesse ocorrido o cruzamento.	Resposta certa.	11
		Faz apenas referência à interferência.	5

Devido à variedade de traçados apresentados, na questão 1.b foram consideradas as respostas nas quais o aluno demonstrou ter percebido, de alguma forma, uma interferência construtiva no primeiro caso, destrutiva no segundo, e que os pulsos continuam com o mesmo formato após o cruzamento.

Nesse teste, a nossa maior intenção era a de identificar teoremas-em-ação relativos às situações trabalhadas durante as aulas, sobre o fenômeno da interferência. Acreditamos ter identificado os seguintes teoremas-em-ação:

- Questão 1.a: quando pulsos de mesmo formato se cruzam, eles sofrem interferência (50,00%); quando pulsos de mesmo formato se cruzam eles sofrem interferência, mas também sofrem reflexão entre eles (31,25%).
 - Questão 1.b: quando pulsos com mesmo formato se cruzam ocorre interferência construtiva, se eles tiverem a mesma fase e interferência destrutiva, se eles tiverem fases contrárias; e após a interferência, esses pulsos recuperam seus formatos iniciais (75,00%).
- As respostas a seguir são aquelas consideradas parcialmente consistentes: ocorre apenas interferência destrutiva (6,25%); ocorre apenas interferência construtiva (6,25%); ocorrem as interferências, mas os pulsos não continuam após o cruzamento (6,25%).

- Questão 2.a: produzindo outra onda circular na mesma superfície e em fase com a primeira onda (31,25%). As repostas a seguir são aquelas consideradas parcialmente consistentes em relação ao que era esperado: produzindo outra onda circular na mesma superfície (43,75%); produzindo outra onda (12,50%).
- Questão 2.b: duas ondas circulares, produzidas em fase na mesma superfície de certa porção de água, produzem interferência construtiva quando há encontro de crista com crista ou vale com vale, e interferência destrutiva quando há encontro de crista com vale (43,75%); há interferência construtiva quando há encontro de crista com crista, vale com vale e crista com vale (50,00%).
- Questão 2.c: após o encontro, as frentes de cada onda continuam como se não houvesse ocorrido o cruzamento (68,75%); quando as frentes de cada onda se encontram, ocorre apenas interferência (31,25%).

Na figura 14 apresentamos um gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação consistentes em relação ao que era esperado como resposta, os parcialmente consistentes e os inconsistentes ou sem resposta.

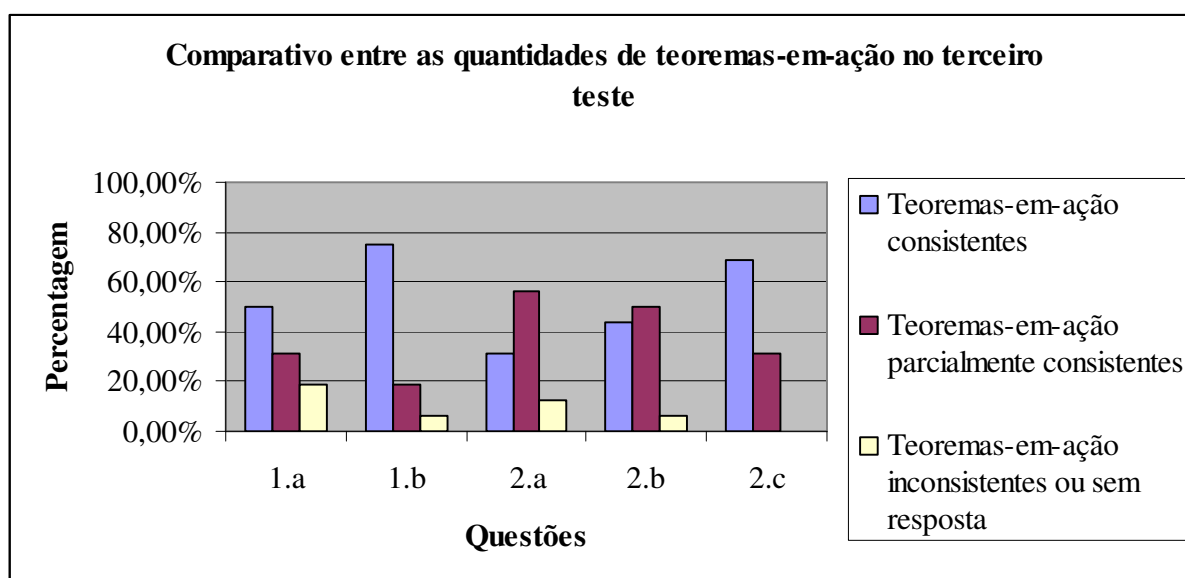


Figura 14 – Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no terceiro teste.

Analisando esse último gráfico, mais uma vez observamos que a quantidade de respostas consistentes e parcialmente consistentes é bem maior que as inconsistentes ou sem resposta.

As questões 1.b e 2.b tratam fundamentalmente da mesma questão: interferência construtiva e destrutiva, a primeira com pulsos unidimensionais e a segunda na superfície da água. Porém, percebemos maiores dificuldades na questão 2.b, evidenciado a dificuldade do aluno em transportar a idéia do fenômeno da interferência em uma dimensão para duas dimensões. Notamos também nas respostas da questão 2.a, a dificuldade do aluno em perceber a necessidade de termos fontes produzindo ondas em fase, para visualizar o fenômeno de interferência, apesar de termos chamado a atenção para essa condição durante as aulas.

6.6. Teste 4 – Difração

Temos a seguir, a tabela 6 com o resumo dos resultados esperados e obtidos no quarto teste na turma de trabalho.

Tabela 6 – Resultados da turma de trabalho no quarto teste.

Questões	Respostas esperadas	Tipos de respostas apresentadas pelos alunos	Grupo de trabalho (N = 16)
1	É a propriedade que uma onda apresenta de contornar um obstáculo ao ser parcialmente interceptada por ele.	Resposta certa.	1
		Respondeu que é a propriedade apresentada por uma onda ao contornar um obstáculo, mas não cita que ela é parcialmente interceptada por ele.	7
		Respondeu apenas que é uma propriedade apresentada por uma onda quando ela é interceptada por um obstáculo.	3
		Respondeu que é uma propriedade apresentada por uma onda quando ela contorna outra onda.	1
		Respondeu que uma propriedade apresentada por uma onda quando ela cruza outra onda.	4
2	O aluno deveria apresentar convenientemente as frentes de onda difratadas com formas curvas.	Todos os itens corretos.	9
		Mostrou as ondas difratadas com formas curvas, porém não posicionou convenientemente, em um ou mais casos, as frentes difratadas com as fendas ou obstáculos.	6
		Mostrou as ondas difratadas com frentes retas.	1
3	Foi usado um estreito feixe de laser incidindo em pequenos obstáculos (cílios postiços, fio de náilon, dentes de um pente) e atravessando pequenas fendas produzidas com um corte de estilete num pedaço de papel escuro.	Resposta certa	10
		Fez apenas referência ao uso de pequenos obstáculos ou pequenas fendas, sem citar que um estreito feixe de luz incidia nos mesmos.	6
4	A luz apresenta comportamento ondulatório.	Resposta certa.	9
		Fez apenas referência a maior dificuldade de se visualizar a difração da luz.	2
		Só confirmou que a luz realmente difrata.	3
		Respondeu que a luz tem comportamento semelhante ao da água.	1
		Respondeu que um feixe de luz não perturba a propagação de outro feixe quando se cruzam.	1

5	Marcar os itens b e d e argumentar que em cada um desses casos a difração propiciou o surgimento de dois conjuntos de frentes de onda que sofreram interferência.	Respostas corretas.	5
		Marcou os itens corretos e só confirmou que houve interferência, sem citar os dois conjuntos formados em cada caso.	2
		Marcou apenas um item correto e argumentou corretamente.	3
		Marcou apenas um item correto e só confirmou que houve interferência, sem citar os dois conjuntos de ondas formados.	3
		Marcou apenas um item correto e fez referência às frentes que sofrem reflexão.	2
		Marcou apenas um item correto e só confirmou que houve difração.	1

Na questão 3, foram consideradas como resposta corretas aquelas nas quais o aluno fazia referência a pelo menos um dos materiais usados.

Mais uma vez, nosso maior objetivo era o de identificar os teoremas-em-ação apresentados pelos alunos quando expostos a situações referentes à difração. As questões faziam referência às situações trabalhadas durante as aulas; com isso, acreditamos ter identificado os seguintes teoremas-em-ação:

- Questão 1: difração é a propriedade que uma onda apresenta de contornar um obstáculo ao ser parcialmente interceptada por ele (6,25%). As respostas a seguir são aquelas consideradas parcialmente consistentes: é a propriedade que uma onda apresenta de contornar um obstáculo (43,75%); é a propriedade apresentada por uma onda quando ela é interceptada por um obstáculo (18,75%).
- Questão 2: ondas com frentes retas produzidas na superfície da água se tornam curvas ao sofrerem difração (56,25%); ondas com frentes retas produzidas na superfície da água se tornam curvas, porém nem sempre curvando a partir da frente que não é interceptada (37,50%).

- Questão 3: para visualizar com nitidez a difração da luz, podemos fazer um estreito feixe de laser ser interceptado por pequenos obstáculos ou atravessar pequenas fendas (62,50%); com pequenos obstáculos ou pequenas fendas podemos visualizar o fenômeno da difração da luz (37,50%). (Nessa última resposta, os alunos não faziam referência à incidência da luz).
- Questão 4: como a luz sofre difração, ela apresenta comportamento ondulatório (56,25%). As respostas a seguir são aquelas consideradas parcialmente consistentes em relação ao que era esperado: a luz é algo que realmente difrata (18,75%); a difração da luz é mais difícil de ser visualizada (12,50%).
- Questão 5: a difração de uma onda com frentes retas interceptadas por um obstáculo central, ou por obstáculos formando duas fendas, forma dois conjuntos de ondas separados que sofrem interferência (31,25%). As respostas a seguir são aquelas consideradas parcialmente consistentes em relação ao que era esperado: a difração de uma onda com frentes retas interceptadas por um obstáculo central, ou por obstáculos formando duas fendas (sem citar a formação de dois conjuntos de ondas separadas), provoca o fenômeno de interferência (12,50%); a difração de uma onda com frentes retas interceptadas por um obstáculo central, ou por obstáculos formando duas fendas (citando apenas um desses casos), forma dois conjuntos de ondas separados que sofrem interferência (18,75%); a difração de uma onda com frentes retas interceptadas por um obstáculo central, ou por duas fendas (citando apenas um desses casos e sem citar os dois conjuntos de ondas formadas), provoca o fenômeno da interferência (18,75%). As respostas que tiveram apenas um item marcado como correto e que o aluno não citou que houve interferência foram considerados inconsistentes.

Na figura 15 a seguir apresentamos um gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação identificados no quarto teste.

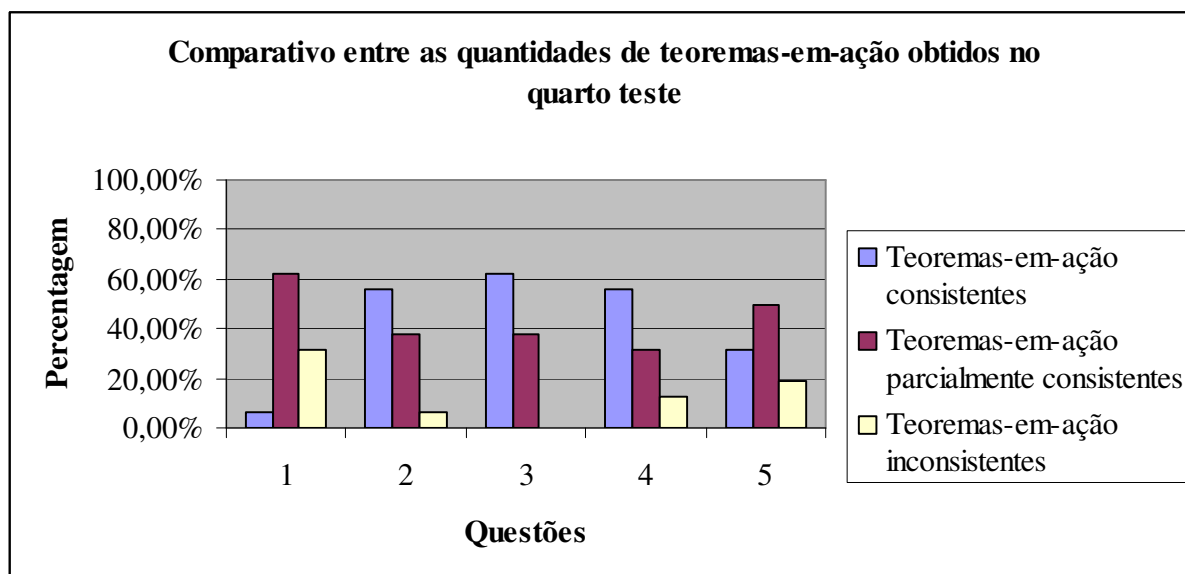


Figura 15 – Gráfico comparativo entre os teoremas-em-ação no quarto teste.

Podemos perceber poucas respostas inconsistentes e aquelas parcialmente consistentes estão próximas do que é cientificamente aceito. Isso nos mostra alunos que atingiram um grau satisfatório de conhecimentos pertinentes ao campo conceitual trabalhado durante as aulas e alunos que explicitaram teoremas-em-ação que podem evoluir para os cientificamente aceitos.

6.7. Confrontando o grupo de trabalho e o grupo de comparação

Nesta seção queremos comparar os resultados obtidos nos testes e no pós-teste do grupo de trabalho com o grupo de comparação.

Nas tabelas 7 e 8 a seguir apresentamos as notas atribuídas nos testes e no pós-teste, a média aritmética e o desvio padrão. Cada aluno é identificado por um número.

Tabela 7 – Notas atribuídas ao grupo de trabalho nos testes e no pós-teste.

Grupo de trabalho (N = 16)					
Alunos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Pós-teste
1	5,8	9,8	9,0	10,0	8,5
2	5,0	3,0	6,7	8,5	6,0
3	7,5	2,8	8,7	4,5	5,0
4	5,0	4,5	6,7	6,7	7,2
5	6,3	10,0	7,0	8,5	5,5
6	6,0	8,3	5,0	9,0	9,5
7	5,5	5,5	8,3	3,0	5,5
8	5,5	5,0	2,5	6,3	6,0
9	6,5	7,2	6,7	6,0	9,0
10	5,0	2,2	6,7	4,7	7,8
11	5,2	7,0	5,8	5,0	5,5
12	6,2	7,2	7,8	5,5	6,0
13	5,5	7,2	8,5	6,0	9,0
14	5,0	3,3	5,8	8,7	9,0
15	7,3	8,5	10,0	6,5	9,5
16	5,0	5,5	9,2	9,5	5,5
Média das notas	5,8	6,1	7,2	6,8	7,2
Desvio padrão	0,81	2,5	1,9	2,0	1,7

Tabela 8 – Notas atribuídas ao grupo de comparação nos testes e no pós-teste.

Grupo de comparação (N = 10)					
Alunos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Pós-teste
1	4,0	5,5	7,5	8,0	1,7
2	6,5	8,8	10,0	9,5	8,3
3	3,5	5,5	4,4	5,0	5,6
4	3,8	3,8	2,8	5,5	5,0
5	3,5	6,5	5,8	4,0	4,0
6	1,5	2,2	3,2	6,7	4,5
7	0,0	4,2	3,8	5,8	9,4
8	4,5	3,0	1,0	1,0	4,0
9	4,0	6,7	5,0	6,5	9,0
10	4,5	7,8	5,8	7,5	5,5
Média das notas	3,6	5,4	4,9	6,0	5,7
Desvio padrão	1,8	2,1	2,5	2,3	2,5

Nas figuras 16 e 17 apresentamos gráficos comparativos entre as médias e os desvios padrões obtidos a partir das notas dos testes.

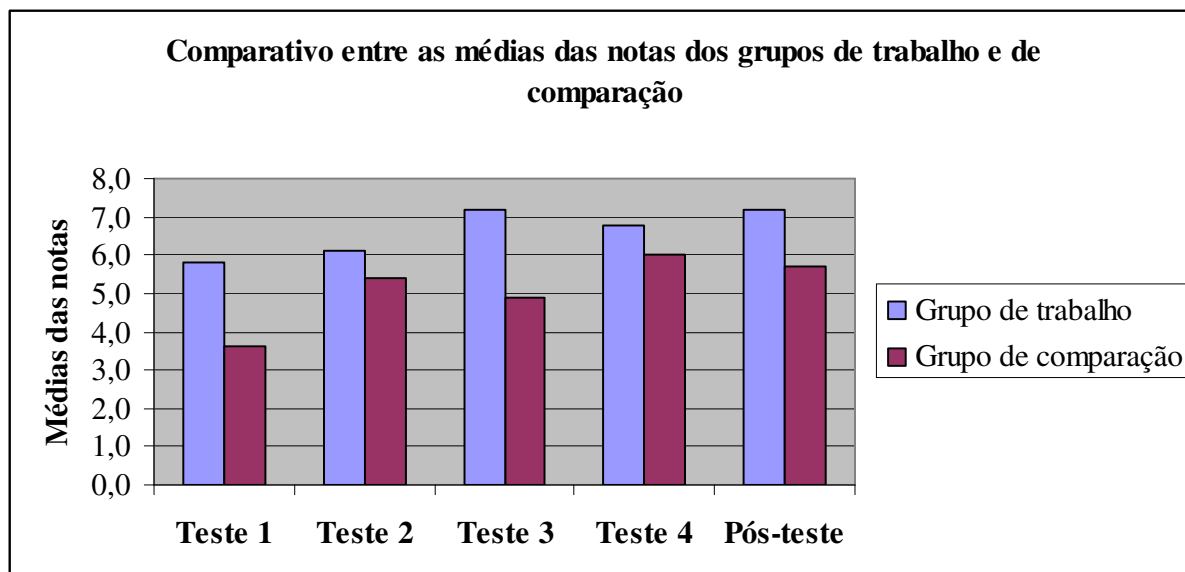


Figura 16 – Gráfico comparativo entre as médias das notas dos testes.

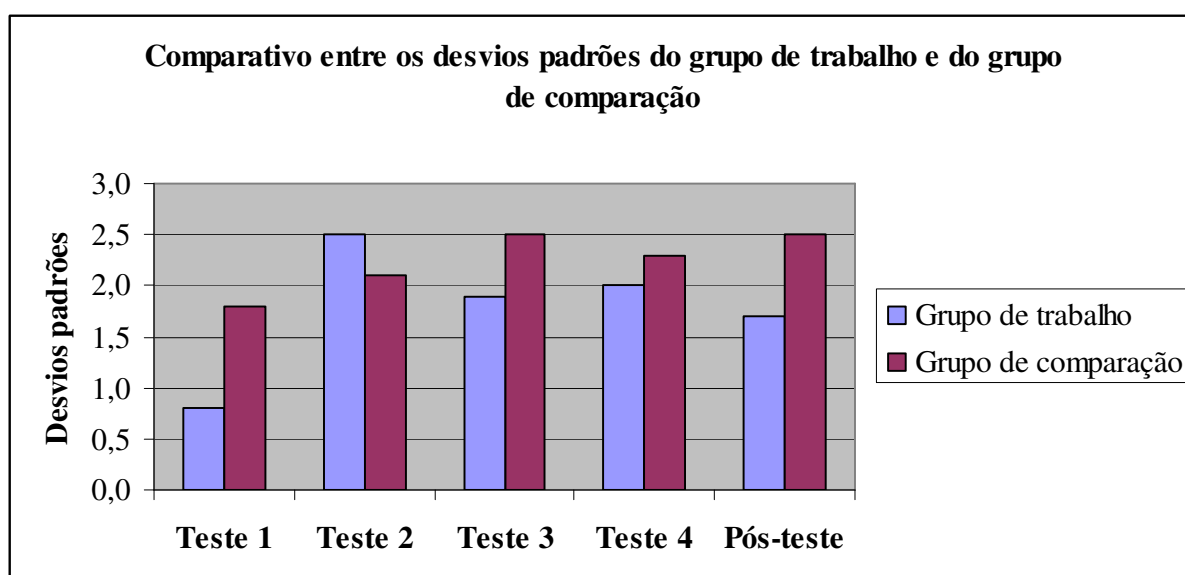


Figura 17 – Gráfico comparativo entre os desvios padrões das notas dos testes.

A partir desses dados constatamos que o grupo de trabalho teve melhor desempenho porque, em todos os testes analisados, as médias das notas dos alunos desse grupo foram melhores e os desvios padrões, a não ser no teste 2, foram menores, evidenciando que, em geral, a dispersão das respostas foi menor. Acreditamos que esse melhor desempenho se deve ao tratamento diferenciado dado a esses alunos, que foram estimulados a explicitarem seus

invariantes operatórios, nos proporcionando oportunidades de intervir no processo de aquisição do conhecimento e promover uma evolução conceitual mais efetiva.

6.8. As aulas gravadas em áudio

Nas aulas no grupo de trabalho nas quais tentávamos promover evolução conceitual, era feito um trabalho de explicitação de conhecimentos-em-ação, partindo de atividades experimentais interativas e perguntas. A partir das respostas dos alunos procurávamos aproximar ao máximo dos conhecimentos cientificamente aceitos. Todo esse conjunto de tarefas e metas consistia das situações proposta no nosso trabalho, por meio das quais procurávamos dar sentidos aos conceitos. A seguir, apresentamos a transcrição de alguns trechos que foram gravados em áudio, nos momentos e que dialogávamos com os alunos, após a apresentação de uma atividade experimental. As respostas transcritas não foram necessariamente dadas pelo mesmo aluno; selecionamos aquelas que nos pareceram mais representativas.

6.8.1. Aulas sobre os conceitos iniciais sobre ondas

Após a apresentação de ondas nas molas e na cuba de ondas:

Professor: *Como foram produzidas as ondas nesses meios?*

Aluno: *Com movimentos; mexendo neles.*

Professor: *Mas movimento de que tipo? (Após muita insistência).*

Aluno: *Movimentos ondulatórios.*

Professor: *E como foi produzida a onda na água?*

Aluno: *batendo nela.*

Professor: *Quando estou produzindo ondas transversais na mola, quem é a geradora dessas ondas?*

Aluno: *Sua mão.*

Professor: *E como ela se movimenta?*

Aluno: *Para cima e para baixo.*

Professor: *Quando estou produzindo ondas longitudinais na mola, como minha mão se movimenta?*

Aluno: *Para frente e para trás.*

Professor: *Vocês conseguem perceber algo em comum no movimento da minha mão na produção dessas ondas na mola? (Nenhum aluno percebeu que ambos os movimentos são vibratórios).*

Nossa intenção era levar o estudante a perceber naturalmente os movimentos oscilatórios transversais e longitudinais como maneiras diferentes de se produzir ondas. Como eles não conseguiram perceber isso, promovemos uma discussão, enfatizando essas diferenças.

Professor: *Observando um ponto da mola durante a passagem da onda transversal; como ele se movimenta?*

Aluno: *Para cima e para baixo.*

Professor: *Observando um ponto da mola durante a passagem da onda longitudinal; como ele se movimenta?*

Aluno: *Para frente e para trás.* (Um aluno teve a idéia de fixarmos um pequeno papel na mola para melhor visualizar o movimento oscilatório).

Professor: *A onda transversal produzida na mola pode ser representada ao longo de uma linha e por isso é denominada unidimensional; a onda provocada na superfície da água pode ser classificada como unidimensional?*

Aluno: *Não, porque temos várias ondas na superfície da água; ela se espalha para todos os lados.*

Professor: *Qual seria uma boa classificação para a onda que se propaga na superfície da água ao invés de unidimensional?* (após muita insistência).

Aluno: *Bidimensional.*

Professor: *Observando como essas ondas foram produzidas, é possível termos ondas no ar?*

Aluno: *Sim.* (Vários afirmam que sim).

Professor: *Como eu poderia produzi-las?*

Aluno: *Através do som.*

Professor: *E como a onda sonora é produzida?*

Aluno: *Através da voz, falando.*

Professor: *Essas ondas que se propagam no espaço, como a onda sonora, podem ser classificadas como unidimensionais ou bidimensionais?*

Aluno: *Tridimensionais.*

Como já tinha sido detectado nos testes, os alunos apresentam dificuldades de associarem o movimento ondulatório sendo gerado a partir de algo vibrando; porém, durante as aulas, com insistência, conseguíamos que alguém expressasse o seguinte teorema-em-ação: *uma onda é mantida a partir de algo que oscila* (normalmente, ao invés de usarem o termo

oscilação, usavam os termos para cima e para baixo ou para frente ou para trás). Muitos expressaram com facilidade o seguinte teorema-em-ação: *um ponto da mola adquire movimento oscilatório durante a passagem de uma onda*. Perceberam com facilidade que a onda que se propaga na superfície da água não pode ser classificada como unidimensional, mas tiveram dificuldades em classificá-la como bidimensional. Muitos reconheceram o som com caráter ondulatório e tridimensional, mas apresentaram dificuldades de associá-lo a outras possíveis fontes que não fossem através da fala. Explicitados todos esses conceitos e teoremas-em-ação não condizentes com o que é cientificamente aceito, procurávamos sempre provocar evolução conceitual nos alunos, através de discussões e argumentações.

6.8.2. Aulas sobre os elementos de uma onda periódica transversal

Após a apresentação de ondas nas molas e na cuba de ondas:

Professor: *Ao se produzir uma onda transversal em uma mola com a mão, alguém seria capaz de desenhar essa onda no quadro?*

Um aluno veio ao quadro e desenhou uma senóide para mais de uma oscilação.

Professor: *Alguém seria capaz de marcar nesse desenho a distância percorrida pela onda quando minha mão executar um movimento completo de subida e descida?* (Utilizando a mola o professor deu a entender que esse movimento é correspondente a uma oscilação completa. Um aluno veio ao quadro e marcou corretamente um comprimento de onda. Outro reconheceu que a distância entre dois vales consecutivos equivale também a um comprimento de onda).

Professor: *Suponha que você executou vinte oscilações completas em dez segundos; quantas oscilações foram feitas em um segundo?*

Aluno: *Duas oscilações por segundo.* (Vários concordaram com essa resposta).

Professor: *Para essa onda produzida com duas oscilações em um segundo eu pergunto: quanto tempo foi gasto em uma oscilação?*

Aluno: *Um segundo.*

Professor: *Um segundo?*

Aluno: *Não, se foram duas oscilações a cada um segundo, teremos meia oscilação por segundo.*

Percebemos então que, por meio das situações apresentadas com ondas transversais na mola, conseguimos fazer com que o aluno explicitasse, com certa facilidade, os seguintes conceitos-em-ação: *comprimento de onda, frequência e período*. Em seguida fizemos toda a formalização dessas grandezas com os respectivos símbolos e unidades. No primeiro teste os alunos apresentaram grande confusão entre os nomes dessas grandezas, seus símbolos, o nome das unidades e seus símbolos. Esses alunos não apresentaram a evolução conceitual como nós desejávamos; eles precisariam ser submetidos a mais situações, terem esses conceitos mais uma vez explicitados e aproximados aos conceitos cientificamente aceitos.

6.8.3. Aulas sobre a equação fundamental das ondas

Mais uma vez iniciou-se com a apresentação das ondas nas molas e na cuba de ondas:

Professor: *Uma onda se move e, logo, ela adquire velocidade; suponha que uma onda percorreu 10 metros em 5 segundos mantendo-se no mesmo meio; quantos metros ela percorreu em 1 segundo?*

Aluno: 2.

Professor: *Como você chegou e esse resultado?*

Aluno: *Dividi 10 por 5.*

Professor: *Que grandeza você calculou dessa onda?*

Aluno: *Comprimento.*

Professor: *Não!* (O professor refaz todo raciocínio e insiste).

Aluno: *Velocidade.*

Professor: *E se eu trocar os 10 metros pelo comprimento de onda (λ), o tempo gasto passa a ter um nome especial; qual é esse nome?*

Aluno: *Frequência?*

Professor: *Não!* (O professor refaz o raciocínio e insiste).

Aluno: *Oscilação.*

Professor: *É o tempo gasto em uma oscilação.*

Aluno: *Período.*

Professor: *Então podemos calcular o valor da velocidade v de uma onda que se propaga em um mesmo meio dividindo o seu comprimento de onda pelo período. (O professor escreve no quadro a seguinte expressão: $v = \frac{\lambda}{T}$, e lembra que T representa o período).*

Professor: *Vocês concordam que essa expressão pode se reescrita assim: $v = \lambda \cdot \frac{1}{T}$?*

(Vários alunos concordam).

Professor: *Mas $\frac{1}{T}$ nos fornece que grandeza? (Após certa insistência).*

Aluno: *Frequência.*

Professor: *Logo temos a expressão $v = \lambda \cdot f$, que é conhecida como a equação fundamental das ondas, com a frequência sendo representada pela letra f .*

As grandezas comprimento de onda, frequência e período já tinham sido conceituadas numa aula anterior. O objetivo dessa aula era o de chegar à equação fundamental das ondas a partir do cálculo do valor da velocidade de algo em movimento uniforme. Percebemos, a partir do diálogo exposto acima, que conseguimos nosso intento. Porém, no primeiro teste quando tentamos fazer o aluno expor esse mesmo raciocínio, não tivemos bons resultados. Acreditamos que isto se deve à grande confusão, ainda explicitada, entre os conceitos de comprimento de onda, frequência e período, como foi constatado nos resultados desse teste; se esses conceitos não estavam bem estabelecidos na estrutura cognitiva, foi difícil para o aluno estabelecer a relação existente entre eles para se chegar ao teorema-em-ação $v = \lambda \cdot f$.

6.8.4. Aulas sobre reflexão de ondas

Após a apresentação de pulsos transversais produzidos numa mola e a observação dos pulsos refletidos numa extremidade fixa e numa extremidade livre:

Professor: *O que acontece com o pulso refletido com a extremidade fixa?*

Aluno: *Ele inverte.*

Professor: *Essa reflexão é dita com inversão de fase; e quando a extremidade é livre?*

Aluno: *não inverte.*

Professor: *Essa reflexão é dita sem inversão de fase.*

Após a apresentação de ondas bidimensionais na superfície da água:

Professor: *Proponha uma maneira para representarmos essa onda produzida na água com a régua tocando nela.*

Aluno: *Com riscos.*

Professor: *E a onda produzida tocando o dedo na água?*

Aluno: *Com círculos.*

Professor: *Como indicaríamos o sentido de propagação dessas ondas produzidas?*

Aluno: *Faça uma linha indicando para os dois lados. (O professor insistiu).*

Aluno: *Com um ponto. (O professor insistiu).*

Professor: *O que mais?*

Aluno: *Algo crescente, espalhando.*

Professor: *O que mais?*

Aluno: *Com traços.*

Os alunos perceberam facilmente que segmentos de reta paralelos (chamados por eles de riscos) e círculos concêntricos (chamados por eles apenas de círculos) são razoáveis para representarmos ondas produzidas na superfície da água com uma régua ou com o dedo, respectivamente; para indicar o sentido de propagação, sugeriram usar linhas orientadas, pontos e traços. A partir dessas respostas, por meio de discussões e argumentações, conceituamos raio de onda e frente de onda.

Após a apresentação de ondas com frentes retas na cuba de ondas sendo interceptadas por obstáculo plano (já conceituamos raio e frente de onda):

Professor: *E se colocarmos um obstáculo interceptando a onda?*

Aluno: *Ela bate e volta.*

Professor: *Como você representaria a onda refletida a partir dessa onda incidente?* (O professor representa no quadro uma onda com frentes retas incidindo com ângulo de incidência igual a 0° para a direita).

Aluno: *É só desenhar uma setinha para cada lado.*

Professor: *E se eu quero representar apenas a parte refletida?*

Aluno: *Para a esquerda.*

Professor: *E como ficariam as frentes de onda?*

Aluno: *Do mesmo jeito.*

Professor: *E se as frentes fossem inclinadas?* (O professor representa no quadro frentes retas com ângulo de incidência diferente de 0°).

Aluno: *Para baixo.* (A partir de então, o professor conceitua reta normal, ângulo de incidência e ângulo de reflexão e esquematiza no quadro).

Professor: *Compare os ângulos de incidência e reflexão.*

Aluno: *eles são iguais.* (O professor observa que na verdade eles são congruentes ou possuem o mesmo valor).

Após a apresentação de ondas com frentes retas na cuba de ondas sendo interceptadas por obstáculos côncavos e convexos:

Professor: *Como a onda com frentes retas interceptada por um obstáculo côncavo refletiu?*

Aluno: *Fechando e circular.*

Professor: *Como você desenharia os raios dessa onda refletida?*

Aluno: *Na mesma direção, só volta.*

Professor: *Eles ficariam paralelos?*

Aluno: *Não.*

Professor: *Como você representaria em um desenho?*

Aluno: *Assim.* (Esse aluno faz um gesto com as mãos indicando dois raios convergindo e outro já mostra um desenho de dois raios convergindo para um ponto no seu caderno).

Professor: *Como a onda com frentes retas interceptada por um obstáculo convexo refletiu?*

Aluno: *Elas voltam abrindo.*

Professor: *As frentes dessa onda refletida voltam retas?*

Aluno: *Não, circulares.*

Professor: *Como você desenharia os raios dessa onda refletida?*

Aluno: *Eles voltam se abrindo.*

Após identificarmos a maneira como o aluno representou ondas bidimensionais produzidas na superfície da água (com segmentos de reta ou com círculos) e como ele representaria a orientação de propagação, conceituamos frentes de ondas e raios de ondas. Ou seja, a partir das respostas apresentadas, procurávamos aproximá-las dos conceitos cientificamente aceitos.

A partir da observação na cuba, notamos que o aluno percebia com clareza o comportamento das ondulações quando refletiam, nos dando a chance de apresentar os termos e as idéias cientificamente aceitos; acreditamos que as situações apresentadas foram propícias para promover evolução conceitual, o que não significa que isso obrigatoriamente aconteceu.

6.8.5. Aulas sobre reflexão de feixes de luz

Começamos fazendo uma revisão de tudo o que foi apresentado sobre reflexão na cuba. Em seguida, apresentamos obstáculos com os mesmos formatos, mas agora espelhados, e ao invés de ondas na água sendo interceptadas, usamos feixes de laser provenientes de uma caneta:

Professor: *O que acontecerá se eu incidir um feixe de laser no espelho plano?*

Aluno: *Vai quebrar.*

Professor: *Vai quebrar?*

Aluno: *Não, vai refletir.* (O professor apresenta feixes de laser refletindo em um espelho plano).

Professor: *Vamos observar como se comporta o feixe de luz refletido; compare com um raio de onda refletido na superfície plana.*

Aluno: *É igualzinho.*

Professor: *O que acontecerá se eu incidir um feixe da luz laser no espelho côncavo e convexo?* (O professor apresenta feixes de luz laser refletindo em uma superfície refletora côncava e convexa, paralelos ao eixo principal).

Aluno: *Refletem iguais aos raios de onda.*

Professor: *Raios de onda e raios de luz refletem obedecendo as mesmas leis; o que isso sugere?*

Aluno: *É a mesma coisa.*

Outro aluno: *A luz é uma onda.*

A partir dessa aula esperávamos que o aluno começasse a perceber o comportamento ondulatório da luz, a partir da similaridade da reflexão de raios de onda e raios de luz. Tivemos a necessidade de lançar mão de elementos da Óptica Geométrica, ao representarmos o estreito feixe de laser como um raio. Nessas situações trabalhadas, vários alunos mostraram estarem convencidos do comportamento ondulatório da luz.

6.8.6. Aulas sobre interferência de ondas

Após a apresentação de dois pulsos transversais numa mola com mesma fase e com fases invertidas. Essa mola estava no chão da sala e os pulsos eram produzidos em sentidos contrários pelos alunos:

Professor: *O que acontece com os pulsos quando eles estão em fase?*

Aluno: *Eles voltam.*

Outro aluno: *Não, eles seguem.*

Outro aluno: *O pulso aumenta.*

Professor: *O que acontece com os pulsos quando eles estão com fases opostas?*

Aluno: *Eles se anulam.*

Após uma discussão sobre interferência construtiva e destrutiva.

Professor: *O fenômeno da interferência ocorre com outras ondas?*

Aluno: *Sim.* (Após certa insistência do professor).

Professor: *Ao produzirmos uma onda com frentes circulares na água batendo com o dedo, como produzir outra onda idêntica para se encontrar com a primeira?* (o professor nesse momento usa a cuba de ondas).

Aluno: *Batendo com o outro dedo.*

Professor: *O que acontece com elas após o encontro?*

Aluno: *Elas seguem.*

Professor: *Será que nesse caso ocorre interferência construtiva e destrutiva?*

Aluno: *Acho que não porque elas não se destroem.*

Professor: *Se eu bater simultaneamente os dois dedos da água forçando essas ondas se cruzar, como você as esquematizaria no quadro?*

Aluno: *Com círculos.* (O professor faz um esquema no quadro, usando um compasso, com dois conjuntos de círculos concêntricos).

Professor: *Levando em conta que os círculos representam as cristas, o que acontece quando a crista de uma se encontra com a crista da outra no momento do encontro?*

Aluno: *Elas param.* (O professor repete a pergunta usando a cuba).

Outro aluno: *Se chocam.* (O professor insiste usando o esquema no quadro).

Outro aluno: *Ela aumenta.*

Professor: *Nesse momento há uma interferência; que tipo de interferência é essa?*

Aluno: *Construtiva.* (O professor mostra no esquema feito no quadro os vários pontos onde há interferência construtiva).

Professor: *O que acontece quando há encontro de crista com vale?* (O professor usa o esquema feito no quadro).

Aluno: *Há interferência destrutiva.*

Outro aluno: *E quando há encontro de uma vale com outro vale?*

Professor: *Ocorre outra interferência construtiva.* (Em seguida o professor apresenta o mesmo esquema feito no quadro, só que agora com círculos concêntricos impressos em duas lâminas transparentes para retroprojeter; primeiro é projetado na parede um conjunto de círculos concêntricos).

Professor: *Esses círculos simulam um instantâneo das frentes de onda produzidas com o meu dedo na água; o que deve ser feito para representarmos outro conjunto de frentes de onda se encontrando com o primeiro conjunto?*

Aluno: *Colocarmos outra figura ao lado.* (Nesse momento o professor apresenta a outra lâmina com a mesma figura da primeira).

Professor: *Agora eu vou superpor essas duas lâminas e observe a figura projetada na parede.* (O professor explora, nessa figura, pontos de interferência construtiva, destrutiva e conceitua linhas nodais).

Sempre após cada conjunto de aulas, era feita uma revisão do conteúdo abordado. Desta vez lançamos mão de uma lista de exercício (apêndice G). Sentimos necessidade disso porque queríamos que o aluno trabalhasse desenhos mais bem feitos e, a partir deles, repassarmos todas as conclusões construídas na última aula.

Mais uma vez, partindo das atividades experimentais com pulsos em uma mola no chão e a partir da respostas apresentadas, tentamos fazer com que o aluno percebesse que quando pulsos se encontram eles não colidem entre si, que eles podem ser tratados de maneira independente e, quando há superposição, pode ocorrer interferência construtiva ou destrutiva. Muitos conseguiram evoluir para essas idéias, apresentando em suas respostas teoremas-embora como: *o pulso aumenta quando a interferência é construtiva; o pulso diminui quando a interferência é destrutiva; os pulsos continuam seu caminho após o encontro.*

A partir da aula com a mola trabalhamos com as ondas bidimensionais na cuba, com o intuito de mostrar que a superposição pode ocorrer. A partir disso, o aluno apresentou mais dificuldade de expressar seus conhecimentos-em-ação, acarretando mais dificuldade para tentarmos promover evolução conceitual. Por isso, usamos uma lista de exercícios na qual repassávamos todos os passos das aulas sobre interferência; ou seja, promovemos mais um ciclo de situações.

6.8.7. Aulas sobre difração

Antes de apresentarmos a difração na cuba de ondas, propusemos algumas situações nas quais frentes de onda retas eram parcialmente interceptadas por obstáculos e questionamos sobre qual seria o formato das frentes não interceptadas. As situações propostas são justamente aquelas da segunda questão do quarto teste (apêndice E). Pouquíssimos alunos sugeriram a possibilidade de essas ondas contornarem os obstáculos; para a maioria, as frentes continuam retas sem difratar. Para aqueles que sugeriram a possibilidade de alguma difração, as frentes continuariam sempre retas e só se espalhariam após certa distância do obstáculo. A partir dessa discussão, na cuba de ondas reproduzimos todas as situações propostas, usando como obstáculos pedaços de madeira e projetávamos na parede usando um retroprojektor:

Professor: Para esse caso, qual o formato das frentes não interceptadas?

Aluno: Ela curvou o obstáculo.

Professor: Este fenômeno se chama difração e pode ocorrer com qualquer onda.

Ao apresentar cada caso, em geral os alunos perceberam a onda contornando o obstáculo quando parcialmente interceptada por ele; o termo “curvou o obstáculo” foi usado nesse sentido. Após apresentarmos a difração por uma fenda, promovemos a seguinte discussão:

Professor: *Compare nesse caso a onda difratada e a onda produzida quando o meu dedo toca na água; qual é a diferença?* (o professor reproduz essas situações na cuba).

Aluno: *A diferença é pequena.*

Professor: *Perceba que a fenda se comporta como uma fonte de onda com frentes circulares, e quanto menor a fenda mais acentuada é difração para a mesma onda.* (O professor varia o comprimento da fenda).

Após apresentarmos a difração por dupla fenda:

Professor: *Observe as ondas difratadas; o que acontece?*

Aluno: *A mesma coisa só que agora com dois círculos.*

Professor: *Essas ondas com frentes circulares que partem das fendas estão em fase; o que acontece com elas?*

Aluno: *Elas se misturam.*

Professor: *Quando é que ocorre difração com as ondas? Use suas palavras.*

Aluno: *Quando elas se dividem.*

Professor: *Ocorre quando elas contornam obstáculos a serem parcialmente interceptadas por eles.*

Após termos discutido essas situações, inclusive dando como exemplo a difração do som, houve a seguinte discussão:

Professor: *Tenho dito que a luz apresenta comportamento ondulatório; sendo assim, ela também não deveria difratar? O que vocês acham?*

Aluno: *Acho que sim.*

Outro aluno: *Acho que não; se fosse assim, agora estaria de dia, porque a luz do Sol que chega ao outro lado da Terra chegaria até nós.* (Lembrando que no momento dessa discussão era noite).

Professor: *Vamos lembrar que a luz deve ser parcialmente interceptada.*

Aluno: *Acho que não, onde não há obstáculo ela passa, mas não contorna.*

Outro aluno: *Se a luz tem um comportamento de onda eu acho que sim.*

Professor: *é verdade que a difração da luz não é facilmente percebida no dia-a-dia.*

Aluno: *Mas um pouquinho ela contorna só que a gente não percebe.*

Professor: *Por que você acha isso?*

O mesmo aluno da resposta anterior: *Porque eu já percebi isso com a luz que entra por uma janela.*

Professor: *A difração da luz é menos evidente por ela ter pequeno comprimento de onda; mas é possível percebermos esse fenômeno com a luz.*

Em seguida apresentamos pequenos obstáculos (cílios postiços, fio de náilon, dentes de um pente) ao invés dos obstáculos de madeira usados na cuba, e pequenas fendas produzidas com um corte de estilete num pedaço de papel escuro, ao invés das fendas usadas na cuba. E ao invés de ondas na água sendo parcialmente interceptadas, usamos feixes laser provenientes de uma caneta:

Professor: se fizermos um estreito feixe de luz laser ser parcialmente interceptado por estes pequenos obstáculos e passar parcialmente nestas pequenas fendas, será que conseguiremos visualizar um fenômeno de difração? (Fizemos então várias demonstrações de feixes de luz laser passando por esses obstáculos, visualizando várias figuras de difração projetadas na parede, na sala de aula escura).

Finalizamos as aulas tentando evidenciar que a luz também sofre interferência:

Professor: Se podemos observar padrões de interferência quando ondas na superfície da água difratam será que podemos observar o mesmo com a luz? O que vocês acham?

Aluno: Não sei, se a luz é um tipo de onda acho que sim. (O professor usa mais uma vez a cuba e mostra dois casos nos quais podemos observar interferência, que são justamente os casos b e d da segunda questão do quarto teste, e também usa os círculos concêntricos impressos em duas lâminas transparentes para retroprojeter).

Professor: Será que podemos repetir essas situações com luz e observar um padrão de interferência? O que vocês acham?

Aluno: Não sei. (Pedimos para os alunos observarem com atenção a figura de difração projetada no quadro, quando o feixe de laser é interceptado pelo fio de náilon e por duas fendas bem estreitas; nesse momento, as lâmpadas da sala estavam apagadas).

Professor: Observe essa figura de difração projetada no quadro; ela é contínua?

Aluno: Sim.

Professor: Olhe mais de perto.

Aluno: Na verdade ela é pontilhada.

Professor: Por que ela é pontilhada?

Aluno: *Não sei.* (refizemos toda a discussão desde a cuba até a figura de difração observada na parede e queríamos que o aluno concluísse que também observávamos uma figura de interferência).

Aluno: *Se podemos comparar com a interferência na cuba, podemos dizer que nos pontos escuros há interferência destrutiva e nos pontos mais claros interferência construtiva.*

Fazer com que o aluno concluísse que, a partir do que observávamos, a luz pode sofrer interferência, não foi uma tarefa fácil. Nenhum aluno notou que a luz difratada que projetávamos era pontilhada, e isso só ocorria quando pedíamos para alguém se aproximar e observar com cuidado. Feito esse trabalho de convencimento, tínhamos que fazer com que o aluno entendesse que isso era devido ao comportamento ondulatório da luz e resolvemos fazer isso comparando com a interferência observada na cuba. Ao final, acreditamos que muitos alunos se convenceram da possibilidade da luz difratar e sofrer interferência.

Como foi evidenciado nas discussões iniciais, pouquíssimos alunos percebiam a possibilidade de uma onda difratar e a maioria conseguiu evoluir conceitualmente e explicitar o seguinte teorema-em-ação a partir das situações propostas: *uma onda pode contornar um obstáculo.* Porém poucos citavam que ela deveria ser parcialmente interceptada.

Ao tentarmos evidenciar a possibilidade da luz difratar, observamos como o tratamento a partir da explicitação de conceitos-em-ação foi produtivo, porque alunos naturalmente notaram que se a luz apresenta comportamento ondulatório ela deve difratar; sua difração não deve ser facilmente percebida. Além disso, um aluno achava esse fenômeno impossível porque se fosse assim, a luz do Sol contornaria a Terra. Tudo isso nos deu grandes possibilidades de apresentar situações que evidenciasse difração e interferência da luz.

A dificuldade apresentada para se perceber a difração e interferência da luz era esperada; são fenômenos difíceis de serem identificados no cotidiano e terminamos a

seqüência de aulas sentido a necessidade de trabalhar mais situações sobre esse assunto. Além disso, tivemos algumas dificuldades extras para trabalharmos as aulas finais: encontrávamos em situação de final de semestre, com alunos mais dispersos, e tínhamos ainda de aplicar o quarto teste e o pós-teste.

7. CONCLUSÕES

Basicamente duas questões motivaram a realização deste estudo: como poderíamos ajudar o aluno a compreender melhor o assunto que nos propomos ensinar a ele? É viável, em termos do processo ensino-aprendizagem, começarmos um curso de Óptica a partir da teoria ondulatória? Acreditamos que a aprendizagem passa pela conceitualização; se o sujeito adquire conceitos cientificamente aceitos ele tem elementos cognitivos mais consistentes e eficientes para lidar com o mundo. Com isso, um dos focos do nosso trabalho foi entender como se dá a aprendizagem do conceito físico para, a partir daí, criarmos estratégias para ajudar o aluno a evoluir conceitualmente, ou seja, incorporar na sua estrutura cognitiva conceitos cientificamente aceitos.

Acreditamos que a teoria dos campos conceituais de Vergnaud nos forneceu elementos satisfatórios para conhecermos melhor os mecanismos pelos quais o sujeito aprende e para nos orientar nas estratégias de ensino que criasse condições para evolução conceitual. Segundo Sousa e Fávero (2002), essa teoria parte do princípio que a obtenção do conhecimento está determinada pelas situações abordadas pelo sujeito e pelas ações que ele executa durante sua resolução; entendendo situação como uma tarefa a ser cumprida. Ao longo do tratamento, procuramos submeter os alunos a situações que pudessem favorecer sua evolução conceitual: a maioria das aulas começava com uma atividade experimental interativa, com perguntas; e a partir das respostas, procurávamos chegar aos conhecimentos cientificamente aceitos. Para isso, procurávamos fazer com que os conhecimentos-em-ação fossem explicitados pelos alunos durante as aulas.

Em geral os resultados foram considerados satisfatórios porque identificamos, na maior parte dos casos, alunos que conseguiram expressar conhecimentos-em-ação condizentes ou

próximos do que era esperado após o tratamento; isso foi constatado pela análise dos testes e pela comparação do pré-teste com o pós-teste. Como é previsto na teoria dos campos conceituais, a evolução conceitual nem sempre ocorre de um só golpe e, nesse caso, os estudantes deveriam ser submetidos a um novo ciclo de situações, tarefa nem sempre possível de ser executada devido ao tempo estipulado que temos para trabalhar com eles.

Acreditamos que os alunos avaliados nos testes estavam predispostos a aprender, pois de um universo de 100 alunos (36 do grupo de comparação e 64 do grupo de trabalho) apenas 26 (10 do grupo de comparação e 16 do grupo de trabalho) participaram de todas etapas avaliativas. Segundo Ausubel, a predisposição para aprender é condição necessária para que ocorra aprendizagem significativa. Além disso, ao compararmos as notas obtidas nos testes e no pós-teste, o grupo de trabalho se saiu melhor; creditamos isso ao tratamento diferenciado dado a esse grupo, cujos estudantes foram levados a expressar seus conhecimentos-em-ação.

Para aqueles cujos testes não foram analisados, temos a seqüência de aulas gravadas em áudio e, pelos trechos transcritos, observamos que com persistência conseguíamos levar muitos a explicitarem raciocínios coerentes ao longo das situações propostas.

Pelos resultados obtidos, acreditamos que os estudantes absorveram bem a correspondência do comportamento de uma onda com o da luz nos fenômenos da reflexão, interferência e difração, indicando para a viabilidade de se começar um curso de Óptica a partir da teoria ondulatória. Nota-se também a viabilidade de se começar a usar o modelo de raio a partir da teoria ondulatória, ou seja, tratarmos a Óptica Geométrica como um caso particular da Óptica Ondulatória. Ao tratarmos a reflexão de feixes de luz tivemos que, naturalmente, usar o modelo de raios de luz e, nas aulas seguintes, usamos o modelo ondulatório para explicarmos a difração e interferência da luz.

As condições de infra-estrutura para a realização deste estudo eram, de maneira geral, precárias. Para a realização das nossas atividades, a escola oferecia quadro, giz e um

retroprojetor. O restante do material, quando nós não tínhamos, foi comprado em lojas comerciais. A maioria dos alunos que participam da Educação de Jovens e Adultos do 3º segmento (equivalente ao Ensino Médio do curso regular) nesta unidade de ensino têm como objetivo principal apenas ter um diploma equivalente ao Ensino Médio; reclamam quando um professor pede para comprar uma apostila, não têm hábito de leitura e poucos pensam em cursar o Ensino Superior. No início, ofereceram certa resistência para responderem as perguntas durante as aulas e reclamavam do grau de exigência das avaliações; não estavam acostumados a desenvolver os procedimentos exigidos pelo nosso estudo. Mas, com calma e persistência, conseguimos estabelecer nosso ritmo de trabalho, necessário para implementar o tratamento a contento.

A maioria dos autores de livros didáticos existentes hoje no mercado brasileiro apresenta primeiro a Óptica Geométrica para, mais tarde, no capítulo sobre ondas, apresentar a Óptica Ondulatória. No nosso trabalho revertermos essa ordem e, por falta de tempo, não avaliamos o impacto na seqüência de um curso de Óptica Geométrica. Portanto, deixamos as seguintes questões em aberto: será que os alunos continuariam a entender a luz como tendo comportamento ondulatório? Eles perceberiam que o modelo de raios e o modelo ondulatório são apenas construções para interpretarmos o comportamento da luz? Será que eles reconheceriam sob quais condições o modelo ondulatório, ou o modelo de raios, deve ser usado? Que novas situações deveríamos propor aos alunos para eles terem condições de evoluir conceitualmente?

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, V. O. Mapas conceituais como instrumentos potencialmente facilitadores da aprendizagem significativa de conceitos da Óptica Física. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

AMBROSE, B. S.; SHAFFER, P. S.; STEINBERG, R. N.; McDERMOTT, L. C. An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. **American Journal of Physics**, v. 67, n. 2, p. 146–155, 1999.

ANDRÉS, M. M.; PESA, M. A. Conceptos-en-acción y teoremas-en-acción en un trabajo de laboratorio de Física. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 4, n. 1, p. 59–75, 2004. Disponível em: <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revista/index.html>>. Acesso em 18 jan. 2008.

BARTHEM, R. **A luz**. 1ª ed. São Paulo, Ed. Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

CATELLI, F.; VICENZI, S. Laboratório caseiro: transformando um laser de diodo para experimentos de Óptica Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 3, p. 393–406, 2002.

CAVALCANTE, M. A.; JARDIM, V.; BARROS, J. A. de A. Inserção de Física Moderna no Ensino Médio: difração de um feixe laser. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 2, p. 154–169, 1999.

COLIN, P.; CHAUVET, F.; VIENNOT, L. Reading images in optics: students' difficulties and teachers' views. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 3, p. 313–332, 2002.

COLIN, P.; VIENNOT, L. Using two models in optics: students' difficulties and suggestions for teaching. **American Journal of Physics**, v. 69, n. S1, p. S36–S44, 2001.

CUDMANI, L. C. de; PESA, M. Obstáculos en el aprendizaje de la polarización luminosa: una experiencia con profesores de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 2, p. 208–225, 1999.

ESCUADERO, C.; MOREIRA, M. A. Resolución de problemas de cinemática em nível médio: estudo de algunas representaciones. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 2, n. 3, p. 5–24, 2002. Disponível em: <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revista/index.html>>. Acesso em: 18 dez. 2007.

FILHO, A. A. D. Demonstre em aula: uma representação do fenômeno de interferência de ondas utilizando lâminas transparentes e retroprojektor. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 15, n. 1, p. 87–93, 1998.

GALILI, I.; LAVRIK, V. Flux concept in learning about light: a critique of the present situation. **Science Education**, v. 82, n. 5, p. 591–613, 1998.

GIRCOREANO, J. P. O ensino da Óptica e as concepções sobre luz e visão. Dissertação de mestrado, Instituto de Física e Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 1997.

GIRCOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O ensino de Óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 18, n. 1, p. 26–49, 2001.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Além da detecção de modelos mentais dos estudantes. Uma proposta representacional integradora. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 31–53, 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino>>. Acesso em: 18 dez. 2007.

HERON, P.R.L.; MELTZER, D.E. The future of physics education research: Intellectual challenges and practical concerns. **American Journal of Physics**, v. 73, n. 5, p. 390–394, 2005.

HUBBER, P. Year 12 students' mental models of the nature of light. **Research in Science Education**, v. 36, n. 4, p. 419–439, 2006.

LANGLEY, D.; RONEN, M.; EYLON, B.–S. Light propagation and visual patterns: preinstruction learners' conceptions. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 34, n. 4, p. 399–424, 1997.

LAVILLE, C.; DIONNE, J. Tradução de Heloísa Monteiro e Francisco Settineri. **A construção do saber: manual de metodologia da pesquisa em ciências humanas**. Porto Alegre: Editora Artes Médicas Sul Ltda.; Belo Horizonte: Editora UFMG, 1999.

McDERMOTT, L. C. Bridging the gap between teaching and learning: the role of physics education research in the preparation of teachers and majors. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 3, 2000. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n3/v5_n3_a1.html>. Acesso em: 18 dez. 2007.

MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 7–29, 2002. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n1/v7_n1_a1.html>. Acesso em: 18 dez. 2007.

PAULO, I. J. C. de; PAULO, S. R. de; RINALDI, C. Um estudo sobre a origem e desenvolvimento de concepções alternativas sobre a natureza da luz ao longo da escolarização a nível médio e fundamental. In: **Atas do I Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**, p. 273–279, 1997.

PESA, M.; CUDMANI, L. C. de; BRAVO, S. Formas de razonamientos asociadas a los sistemas preconceptuales sobre naturaleza y propagación de la luz: resultados de una experiencia piloto. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 1, p. 7–16, 1995.

PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o papel do conhecimento físico no entendimento do mundo: In PIETROCOLA, M. (Org.). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis, Ed. da UFSC, p. 9–32, 2005.


RAFTOPOULOS, A.; KALYFOMMATOU, N.; CONSTANTINO, C. P. The properties and the nature of light: the study of Newton's work and the teaching of Optics. **Science & Education**, v. 14, n. 7–8, p. 649–673, 2005.

SOUSA, C. M. S. G.; FÁVERO, M. H. Análise de uma situação de resolução de problemas de Física, em situação de interlocução entre um especialista e um novato, à luz da teoria dos campos conceituais de Vergnaud. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 1, p. 55–75, 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>>. Acesso em: 18 dez. 2007.

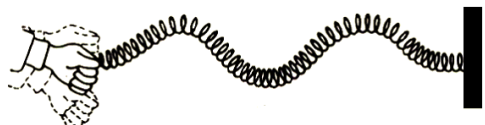
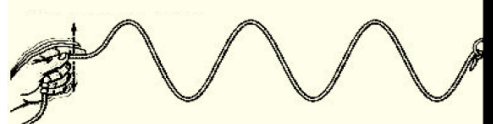
WOSILAIT, K.; HERON, P. R. L.; SHAFFER, P. S.; McDERMOTT, L. C. Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. **American Journal of Physics**, v. 67, n. S1, p. S5–S15, 1999.

9. APÊNDICES

Apêndice A – Pré-teste

Centro Educacional 06 de Taguatinga Educação de Jovens e Adultos 1ª Avaliação de Física 2	
Nome: _____ Turma: _____	
Data: / / _____	
<p>Para efeito de simplificação, nas questões 1 e 2 considere os corpos como pontos materiais, ou seja, corpos cujas dimensões podem ser desprezadas, quando comparadas às demais dimensões envolvidas na situação em estudo, de modo que ele pode ser representado, para todos os efeitos práticos, por um único ponto, no qual se concentra toda a sua massa.</p>	<p>5. O que é luz para você? Explique com suas palavras.</p>
<p>1. Quando é que um corpo se encontra em movimento?</p> 	<p>6. Como você representaria a luz emanando de uma lâmpada acesa? Explique e faça um desenho.</p> <p>Explicação:</p>
<p>2. O movimento de um corpo pode ser alterado. Quais as alterações possíveis de acontecerem no movimento de um corpo?</p> 	<p>Desenho:</p> <div style="text-align: center;">  </div>
<p>3. Você já deve ter observado sistemas ondulatórios como, por exemplo, aquele que contém ondas se propagando em uma corda esticada. O que deve, obrigatoriamente, estar presente neste sistema para manter as ondas se propagando na corda?</p> 	<p>7. Quais os fenômenos que você identifica estarem relacionados com a luz?</p>
<p>4. Quando ondas se propagam em um corda esticada, esta começa a se movimentar de uma maneira bem particular. Imagine um ponto na corda, durante a passagem das ondas, e descreva o que acontece com esse ponto. Se quiser, esboce um desenho.</p> 	<p>8. Você acha que há alguma relação entre ondas e luz? Justifique sua resposta seja ela sim ou não.</p>
<p>Desenho:</p> 	

Apêndice B – Teste 1

Centro Educacional 06 de Taguatinga Educação de Jovens e Adultos 2ª Avaliação de Física 2	
Nome: _____	Turma: _____
Data: ____ / ____ / ____	
<p>1. A seguir temos esquematizado uma onda transversal produzida em uma mola.</p>  <p>a) Como você deve movimentar sua mão para produzir essa onda?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>b) Marque um ponto da mola e responda: como ele se movimenta durante a passagem da onda?</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	<p>c) Suponha que sua mão executou, a partir da posição onde ela está no esquema desta questão, 10 oscilações completas num tempo de 5 segundos. Calcule quantas oscilações sua mão executou em 1 segundo.</p> <p>_____</p> <p>d) No item anterior (item c) foi pedido para você calcular a quantidade de oscilações pela unidade de tempo, que no caso era de 1 s. Como se denomina essa quantidade? Qual é o símbolo usual?</p> <p>_____</p> <p>e) Com relação ao item anterior (item d): calcule o tempo gasto para sua mão executar uma oscilação completa.</p> <p>_____</p> <p>f) Como se denomina o tempo gasto em uma oscilação completa? Qual é o símbolo usual?</p> <p>_____</p>
<p>2. As ondas que podem ser representadas se propagando ao longo de uma linha são denominadas ondas unidimensionais (dentre as dimensões de uma linha, apenas é relevante medir o seu comprimento, ou seja, apenas uma dimensão). A onda esquematizada na questão anterior representa um exemplo de onda unidimensional. As ondas se propagando na superfície da água podem ser classificadas como unidimensionais? Justifique.</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	<p>4. Ondas se movem e logo podemos calcular velocidades para elas. Considerando que a onda da questão anterior (questão 3) se move com velocidade cujo valor é constante, calcule esse valor, considerando que em 2 s essa onda percorre 8 m.</p> <p>_____</p>
<p>3. Na figura a seguir é esquematizada uma onda transversal produzida numa corda esticada. Suponha que essa onda é gerada pelo movimento regular e repetitivo da sua mão:</p>  <p>a) A partir da posição onde está a mão no esquema acima, desenhe a onda produzida em um oscilação completa.</p> <p>Desenho:</p> <p>_____</p> <p>b) A distância que a onda percorre em uma oscilação completa tem um nome especial e um símbolo usual. Qual é esse nome e qual é o símbolo?</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	<p>5. Se ao invés de 8 m tomássemos a distância que a onda percorre em uma oscilação completa (que tem um nome e um símbolo usual) e o respectivo tempo (que também tem um nome e um símbolo usual). A partir desses novos dados, proponha uma expressão matemática para calcularmos o valor da velocidade, usando os símbolos usuais. Considere a letra “v” como o símbolo para o valor da velocidade.</p> <p>_____</p>

Apêndice C – Teste 2

Centro Educacional 06 de Taguatinga Educação de Jovens e Adultos 3ª Avaliação de Física 2	
Nome: _____	Turma: _____
Data: / / _____	
<p>1. Um exemplo muito comum de movimento ondulatório é o de ondas se propagando na superfície da água. Na figura a seguir está esquematizada uma onda que se propaga na superfície da água e que se dirige para um obstáculo plano; as linhas paralelas representam as cristas da onda e podem se chamadas de frentes de onda.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>a) Represente na figura acima um raio de onda para as frentes de ondas esquematizadas.</p> <p>b) Represente na figura a seguir as frentes de onda refletidas e o respectivo raio de onda refletido.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>c) Represente na figura a seguir o raio de onda incidente e o seu raio de onda refletido, sem as frentes de onda. A seguir, na mesma figura, represente a reta normal no ponto de incidência e indique os ângulos de incidência e de reflexão pelas letras i e r, respectivamente.</p> <p>i: ângulo de incidência r: ângulo de reflexão</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>d) Comparando os ângulos de incidência e o de reflexão, podemos afirmar que: eles são iguais, i é maior que r ou i é menor que r?</p>	<p>2. Considere ainda a situação de ondas com frentes retas se propagando na superfície da água; mas agora, incidindo em obstáculos cilíndricos côncavos e convexos:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin: 10px 0;"> <div style="text-align: center;"> <p>Obstáculo cilíndrico côncavo</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Obstáculo cilíndrico convexo</p> </div> </div> <p>a) Represente, na figura acima, e para cada caso, dois raios de onda: um acima e outro abaixo da linha pontilhada.</p> <p>b) Na figura a seguir, represente as frentes de onda refletidas com os respectivos raios de ondas refletidos.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin: 10px 0;"> <div style="text-align: center;"> <p>Obstáculo cilíndrico côncavo</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Obstáculo cilíndrico convexo</p> </div> </div> <p>3. Na figura a seguir, ao invés de ondas se propagando na água, esquematizadas com frentes e raios de onda, temos esquemas de estreitos feixes de luz, representados por raios de luz, incidindo em um espelho plano, em um espelho cilíndrico côncavo e em um espelho cilíndrico convexo.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin: 10px 0;"> <div style="text-align: center;"> <p>Espelho plano</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Espelho cilíndrico côncavo</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Espelho cilíndrico convexo</p> </div> </div> <p>Considerando que foi tratado durante as aulas, a partir das respostas das questões 1 e 2 e a partir dos esquemas desta questão, o que se pode afirmar sobre o comportamento da luz, em termos do seu comportamento relativo à reflexão?</p>

Apêndice D – Teste 3

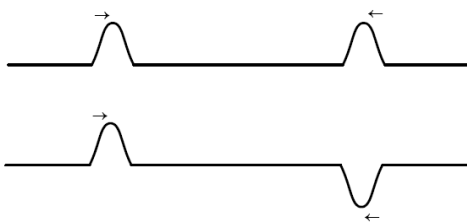
Centro Educacional 06 de Taguatinga
Educação de Jovens e Adultos
4ª Avaliação de Física 2

Nome: _____

Turma: _____

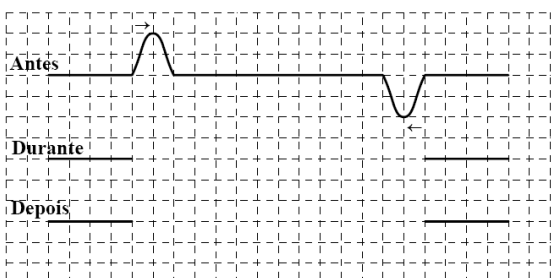
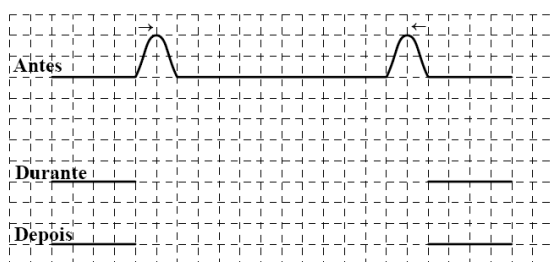
Data: ____ / ____ / ____

1. Durante as aulas, foram mostrados pulsos transversais produzidos em uma mola esticada; esses pulsos foram forçados a se encontrarem, como é esquematizado na figura a seguir.

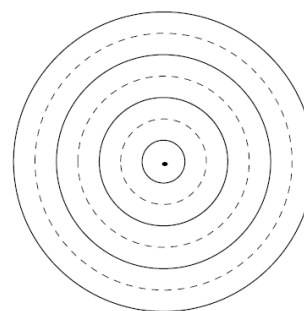


a) Um aluno afirmou: esses pulsos vão sofrer reflexão ao se encontrarem. Esse aluno está correto? Justifique sua resposta.

b) Considerando que esses dois pulsos possuem as mesmas dimensões e velocidades com mesmo valor, trace a seguir a forma da perturbação durante e após a superposição. Despreze qualquer dissipação de energia.



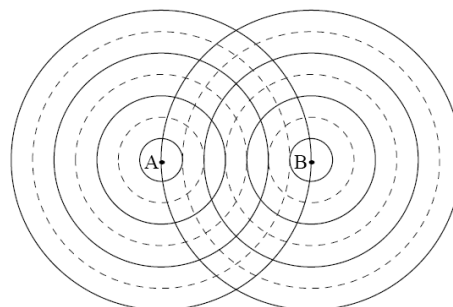
2. A figura a seguir representa uma onda com frentes circulares que foram produzidas batendo regularmente um dedo na superfície de uma certa porção de água:



Considere que as cristas são representadas pelas linhas cheias e os vales pelas linhas tracejadas.

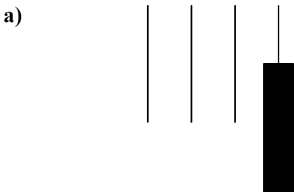
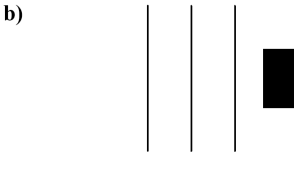
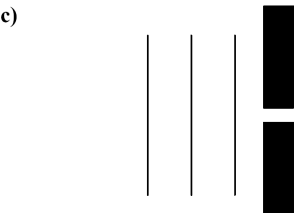
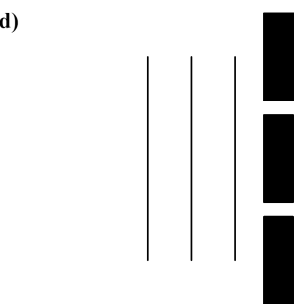
a) Explique como poderíamos produzir ondas da forma descrita acima para podermos visualizar o fenômeno de interferência de ondas.

b) A figura a seguir representa, em um determinado instante, a vista superior das cristas e dos vales de duas ondas que foram produzidas nos pontos A e B, de mesma frequência, e que estão em fase, ou seja, emitem uma crista ou um vale no mesmo instante. Marque com pequenos círculos cheios quatro pontos de interferência construtiva e com pequenos círculos vazios quatro pontos de interferência destrutiva.




c) Como se comportam as frentes de onda depois de finalizado o cruzamento?

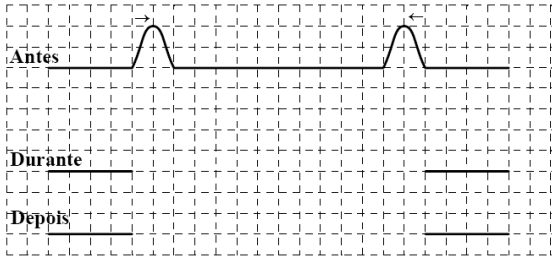
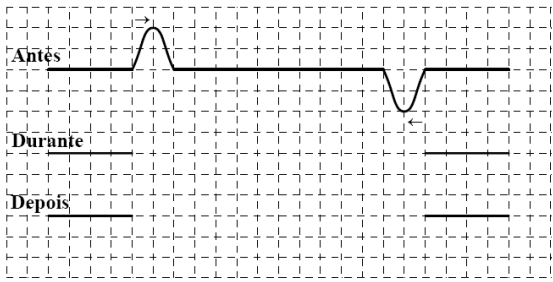
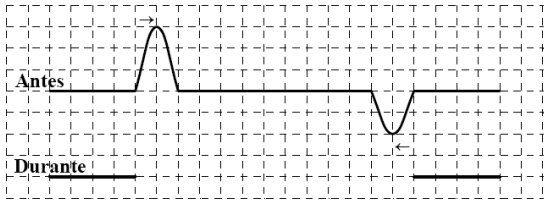
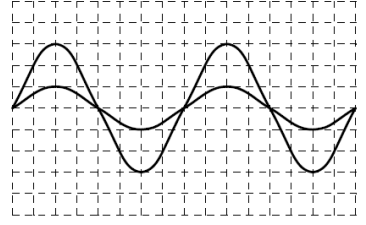
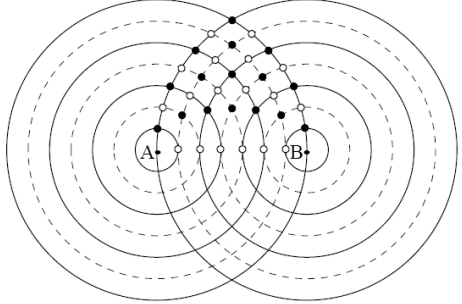
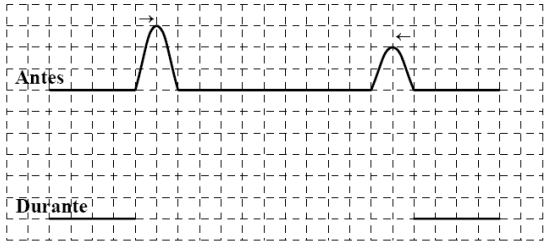
Apêndice E – Teste 4

Centro Educacional 06 de Taguatinga Educação de Jovens e Adultos 5ª Avaliação de Física 2	
Nome: _____	Turma: _____
Data: / / _____	
1. Descreva brevemente, com suas palavras, o fenômeno de difração de uma onda. _____ _____ _____ _____	3. Se ao invés das ondas esquematizadas na questão anterior (questão 2) tivermos feixes de luz, não conseguiremos visualizar com nitidez o fenômeno da difração, porque esses obstáculos e fendas são grandes quando comparados com o comprimento de onda da luz. Que procedimento foi desenvolvido pelo professor, durante algumas aulas, para que se pudesse visualizar com nitidez a luz sofrendo difração? Explique com suas palavras. _____ _____ _____ _____
2. Nas figuras a seguir estão esquematizadas ondas que se propagam na superfície da água e que serão parcialmente interceptadas por obstáculos planos. As linhas paralelas representam as cristas da onda e podem se chamadas de frentes de onda. Em cada caso, desenhe o formato das frentes de onda não interceptadas. a) 	4. Diante das evidências apresentadas durante as aulas sobre a ocorrência da difração da luz, o que se pode afirmar sobre a luz, em termos do seu comportamento relativo à difração? _____ _____ _____
b) 	5. Em duas situações dentre aquelas apresentadas na questão 2, foi possível visualizar também o fenômeno de interferência. Marque com "X" quais são essas situações e explique brevemente, com suas palavras, como isso foi possível. As situações são: a.() b.() c.() d.() Explicação: _____ _____ _____ _____
c) 	_____ _____ _____ _____
d) 	_____ _____ _____ _____

Apêndice F – Pós-teste

Centro Educacional 06 de Taguatinga Educação de Jovens e Adultos 6ª Avaliação de Física 2	
Nome: _____	Turma: _____
Data: ____ / ____ / ____	
<p>Durante as aulas vimos como ondas podem ser produzidas. Visualizamos ondas se propagando em molas e na superfície da água e, além disso, identificamos o som como um fenômeno de características ondulatórias. Vimos também que durante sua propagação, uma onda pode sofrer reflexão, interferência e difração.</p>	<p>5. Descreva brevemente o fenômeno de difração de uma onda.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
<p>1. Você observou, durante as aulas, sistemas ondulatórios como, por exemplo, aquele que contém uma onda se propagando em uma mola esticada. Explique, brevemente, como essa onda pode ser produzida.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	<p>6. Como você representaria a luz emitida por uma lâmpada acesa? Explique e faça um desenho.</p> <p>Explicação:</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
<p>2. Quando uma onda se propaga em uma mola esticada, ela (a mola) se movimenta de uma maneira bem particular. Imagine um ponto da mola, durante a passagem da onda e descreva o que acontece com esse ponto. Esboce um desenho que mostre o movimento desse ponto ao longo do tempo.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	<p>Desenho:</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;">  </div> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
<p>Desenho:</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	<p>7. Você acha que há alguma relação entre ondas e luz? Justifique sua resposta seja ela sim ou não.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
<p>3. Descreva brevemente o fenômeno de reflexão de uma onda.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	
<p>4. Descreva brevemente o fenômeno de interferência de uma onda.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	
<hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	

Apêndice G – Exercícios sobre interferência de ondas

Centro Educacional 06 de Taguatinga Educação de Jovens e Adultos Exercícios de Física 2 • Interferência de ondas	
Nome: _____	Turma: _____
Data: ____ / ____ / ____	
<p>1. Para cada caso a seguir estão representados dois pulsos idênticos, num certo instante, movendo-se em sentidos opostos com velocidades de mesmo valor ao longo de uma corda. Trace a forma da perturbação durante e após a superposição. Despreze qualquer dissipação de energia.</p> <p>a)</p>  <p>b)</p> 	<p>b)</p>  <p>3. A figura a seguir mostra um trecho de uma corda na qual duas ondas se propagam. Estão representadas, num certo instante, as perturbações que cada onda produziria isoladamente. Trace, na própria figura, a forma da perturbação resultante no instante representado.</p>  <p>4. A figura a seguir representa, num determinado instante, a vista superior das cristas (linhas cheias) e dos vales (linhas tracejadas) de duas ondas que foram produzidas na superfície de um líquido nos pontos A e B, de mesma frequência, e que estão em fase, ou seja, emitem uma crista ou um vale no mesmo instante. Além disso, foram marcados pequenos círculos (cheios ou vazios) no ponto de encontro dessas linhas.</p>  <p>Que tipo de interferência ocorre nos pontos marcados com esses pequenos círculos? Justifique.</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
<p>2. Nas figuras a seguir são esquematizados, em uma corda, dois pulsos de amplitudes diferentes se deslocando em sentidos opostos e com velocidades de mesmo valor. Esses pulsos se superpõem, formando uma figura de interferência. Trace a forma da perturbação resultante durante a superposição, desprezando qualquer dissipação de energia.</p> <p>a)</p> 	

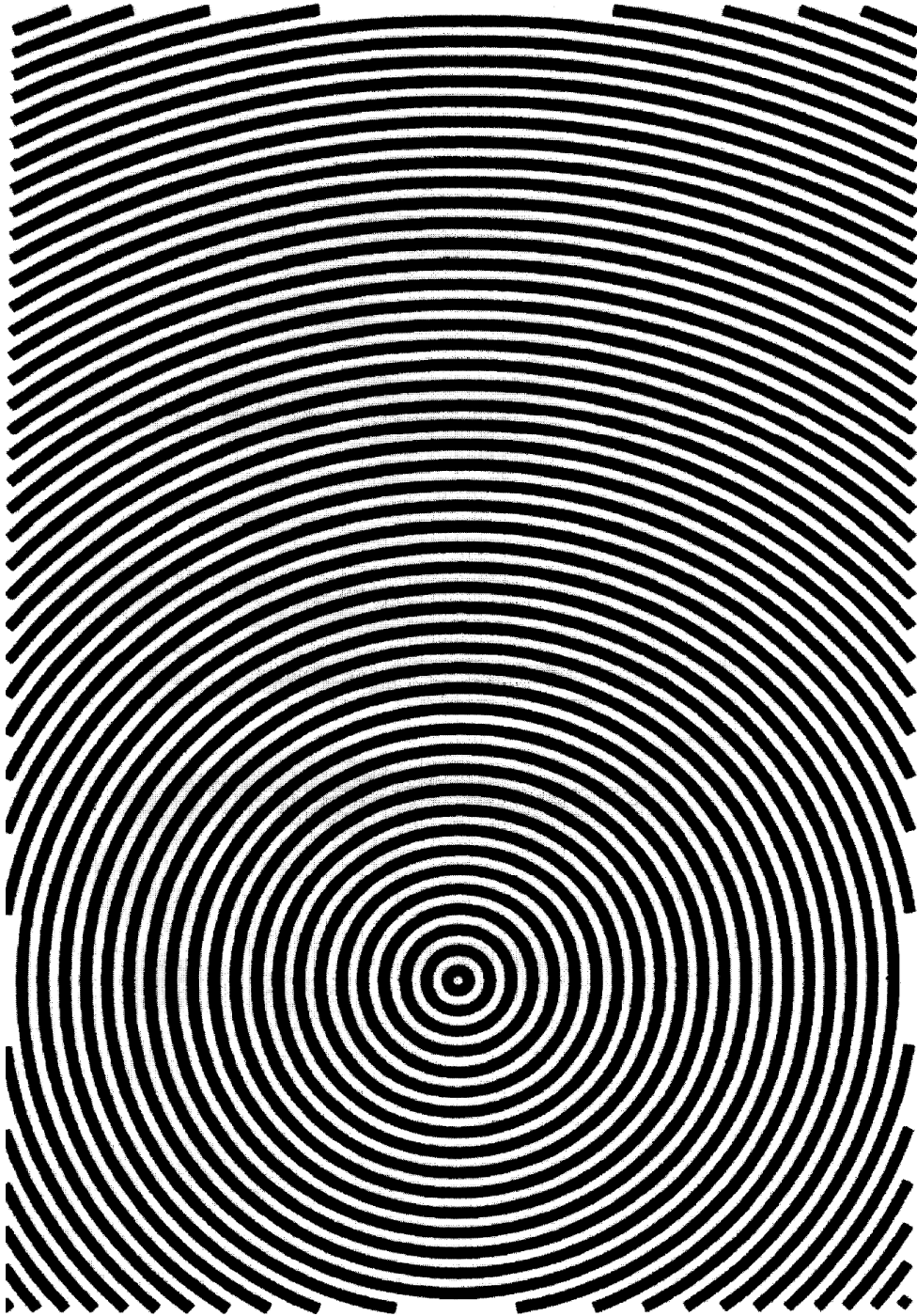
Apêndice H – CD Rom (proposta de ação profissional)

Neste apêndice consta o CD ROM com a proposta de ação profissional elaborada neste trabalho, que se configura como o produto educacional por nós produzido na forma de um manual de apoio ao professor de Física. O conteúdo deste CD poderá ser acessado pela página do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília, pelo endereço <http://www.unb.br/ppgec/dissertacoes.htm>.



10. ANEXOS

Anexo A – Círculos concêntricos representando frentes de onda circulares



Anexo B – Figura de interferência

