

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
MESTRADO EM FÍSICA**

**MAPAS CONCEITUAIS COMO INSTRUMENTOS POTENCIALMENTE FACILITADORES
DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE CONCEITOS DA ÓPTICA FÍSICA**

VOLTAIRE DE OLIVEIRA ALMEIDA

**Porto Alegre
2006**

**MAPAS CONCEITUAIS COMO INSTRUMENTOS POTENCIALMENTE FACILITADORES
DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE CONCEITOS DA ÓPTICA FÍSICA**

VOLTAIRE DE OLIVEIRA ALMEIDA

**Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Física, curso de Pós-
graduação em Física, Instituto de Física, Universidade
Federal do Rio grande do Sul.**

Orientador: Prof. Dr Marco Antonio Moreira

Ao meu pai (in memoriam), um homem de muitos talentos, que me ensinou sobre perseverança.

Agradecimentos

Ao concluir um trabalho de dissertação de mestrado, chega-se a algumas constatações, entre elas, a certeza de que nada é feito isoladamente. Esse é o momento de lembrar de todas as pessoas que envolvi de alguma maneira, e que tão atenciosamente me auxiliaram quando precisei.

Muito obrigado

Ao professor Marco Antonio Moreira, pelas orientações, pela confiança, apoio e oportunidade de desenvolvimento;

Aos colegas e amigos Ives Solano Araújo, Pedro F. T. Dorneles, Rogério Chiarelli e Neusa Massoni, pelo apoio, incentivo e pelas sugestões, que muito contribuíram;

A minha esposa e a minha mãe, pela compreensão nos momentos de ausência, pelo apoio e auxílio nos períodos difíceis;

A professora Eliane Veit, pelo incentivo e valorização;

Ao professor Fernando Lang da Silveira, pelo auxílio no tratamento estatístico do instrumento de pesquisa;

Aos professores José Henrique dos Santos e Márcia R. Gallas, pelo auxílio na elaboração do instrumento de pesquisa e o espaço em sala de aula;

Aos professores Pedro Luis Grande, Ruth de S. Schneider, Luiz F. Ziebel, Rubem E. Junior, Werner Sauter e Renato Pakter, pelo espaço em sala de aula para aplicação do questionário;

Ao professor Ricardo R. B. Correia, pelo auxílio na elaboração do instrumento de pesquisa, o apoio e espaço em sala de aula e pelas discussões sobre Óptica Física;

Ao professor Sebastián Gonçalves pelo auxílio na elaboração do instrumento de pesquisa e ao professor Silvio R. Dahmen pela atenção e pré-disposição em me auxiliar;

Aos professores Paulo H. Dionísio e Raul Carlos F. Filho, pelo apoio e espaço em sala de aula;

A todos os alunos que foram envolvidos de alguma maneira para o desenvolvimento dessa pesquisa, em especial, aos que participaram diretamente das atividades em sala de aula;

Aos funcionários do Instituto de Física, que tão paciente e prontamente atenderam as minhas solicitações.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1 - INTRODUÇÃO	10
2 - REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 - O ENSINO DE FÍSICA E AS DIFICULDADES QUE OS ESTUDANTES TÊM NA COMPREENSÃO DE CONCEITOS CIENTÍFICOS	14
2.2 - CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS EM ÓPTICA.....	18
2.3 – MAPAS CONCEITUAIS E SUA UTILIZAÇÃO NO ENSINO DE CIÊNCIAS.....	56
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	66
3.2 - APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E A APRENDIZAGEM MECÂNICA: OS DOIS EXTREMOS DE UM CONTINUUM.....	72
3.3 – SUBSUNÇORES E AS CONDIÇÕES PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	75
4 – CONSTRUÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA.....	79
4.1 – OBJETIVOS E O OBJETO DE ESTUDO.....	79
4.2 – DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DA PESQUISA.....	80
4.3 – ELABORAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE PESQUISA	80
4.4 – O TRATAMENTO DO GRUPO EXPERIMENTAL.....	85
5 - RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS	92
5.1 – APLICAÇÃO DOS TESTES INICIAL E FINAL	92
5.2 – ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS GRUPOS EXPERIMENTAL E DE COMPARAÇÃO	98
5.3 – DESCRIÇÃO QUALITATIVA	100
6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
APÊNDICE A.....	132
APÊNDICE B	140
APÊNDICE C	147
APÊNDICE D	155
APÊNDICE E	158
APÊNDICE F.....	190
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	225

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COEFICIENTE DE FIDEDIGNIDADE	84
TABELA 2: COEFICIENTE DE FIDEDIGNIDADE DO INSTRUMENTO DE PESQUISA	85
TABELA 3: RELAÇÃO ENTRE AS QUESTÕES E OS CONCEITOS ABORDADOS	93
TABELA 4: RESPOSTAS DOS TESTES INICIAL E FINAL DO GRUPO EXPERIMENTAL	94
TABELA 5: ESCORES DOS TESTES INICIAL E FINAL DOS ALUNOS DO GRUPO EXPERIMENTAL	94
TABELA 6: COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES INICIAL E FINAL DO GRUPO EXPERIMENTAL.....	95
TABELA 7: TESTE "T" PARA DADOS PAREADOS A PARTIR DO GRUPO EXPERIMENTAL	96
TABELA 8: RESPOSTAS DOS TESTES INICIAL E FINAL DO GRUPO DE COMPARAÇÃO	96
TABELA 9: ESCORES DOS ALUNOS DO GRUPO DE COMPARAÇÃO.....	97
TABELA 10: ANÁLISE ENTRE OS TESTES INICIAL E FINAL DO GRUPO DE COMPARAÇÃO	97
TABELA 11: ANÁLISE DO DESEMPENHO NO PRÉ-TESTE DOS GRUPOS EXPERIMENTAL E DE COMPARAÇÃO ...	98
TABELA 12: RESPOSTAS DO TESTE FINAL DOS GRUPOS EXPERIMENTAL E DE COMPARAÇÃO	99
TABELA 13: ANÁLISE DO DESEMPENHO NO PÓS-TESTE DOS GRUPOS EXPERIMENTAL E DE COMPARAÇÃO ...	99
TABELA 14: CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS IDENTIFICADAS	101
TABELA 15: FREQUÊNCIA DOS PRINCIPAIS CONCEITOS ESTUDADOS	104
TABELA 16: CATEGORIAS E SUBCATEGORIAS PARA AS RELAÇÕES DE SIGNIFICADO APRESENTADAS NOS MAPAS CONCEITUAIS.	124

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: VISUALIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS SUSPENSAS NO AR.	23
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO DOS RAIOS PARALELOS (I) E A MAIS ADEQUADA NESSA ABORDAGEM (II).....	24
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DOS RAIOS LANTERNA (I) E A CIENTÍFICA (II).	25
FIGURA 4: FORMAÇÃO DA SOMBRA DE UM OBJETO ILUMINADO POR UMA FONTE PONTUAL.	26
FIGURA 5: FORMAÇÃO DA IMAGEM DE UM OBJETO POR UM ORIFÍCIO.	26
FIGURA 6: RESULTADO DA ADIÇÃO DAS CORES PRIMÁRIAS DA LUZ.	27
FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO DA DISPERSÃO.	28
FIGURA 8: REFLEXÃO ESPECULAR.....	30
FIGURA 9: REFLEXÃO DIFUSA.	30
FIGURA 10: REPRESENTAÇÃO DA 1 ^ª LEI DA REFLEXÃO.	31
FIGURA 11: LANTERNA ILUMINANDO UMA PAREDE DE UMA SALA FECHADA.	32
FIGURA 12: VISUALIZAÇÃO DE UM OBJETO UTILIZANDO OS CONCEITOS CIENTÍFICOS (A); RAIOS VISUAIS (B).	32
FIGURA 13: REPRESENTAÇÃO DA REFRAÇÃO.	33
FIGURA 14: REFLEXÃO INTERNA TOTAL.....	34
FIGURA 15: INCIDÊNCIA DE ONDA PLANA.....	35
FIGURA 16: FIGURA DE DIFRAÇÃO PRODUZIDA POR UMA FENDA SIMPLES.	36
FIGURA 17: MÁXIMOS E MÍNIMOS DE INTERFERÊNCIA NO EXPERIMENTO DE YOUNG.	38
FIGURA 18: (A) INTERFERÊNCIA A PARTIR DE UMA ONDA PLANA DIFRATADA. (B) APROXIMAÇÃO PARA OS RAIOS R_1 E R_2	40
FIGURA 19: FIGURA DE INTERFERÊNCIA PRODUZIDA POR DUAS FENDAS.	41
FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO DAS DISPOSIÇÕES DO CAMPO ELÉTRICO EM UMA ONDA NÃO POLARIZADA (A) E DE ONDAS PLANO-POLARIZADAS (B).	42
FIGURA 21: POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO POR UM FILTRO POLARIZADOR.	42
FIGURA 22: ONDA ELETROMAGNÉTICA PLANO-POLARIZADA.	43
FIGURA 23: REPRESENTAÇÃO DE LUZ NÃO-POLARIZADA.	43
FIGURA 24: DECOMPOSIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO.....	44
FIGURA 25: POLARIZAÇÃO ELÍPTICA.	44
FIGURA 26: FORMAÇÃO DE IMAGEM POR ESPELHO PLANO.	46
FIGURA 27: IMAGEM DE OBJETO EXTENSO EM ESPELHO PLANO.....	46
FIGURA 28: IMAGEM ESTÁ NA SUPERFÍCIE DO ESPELHO.	47
FIGURA 29: REDUÇÃO DA IMAGEM COM O AUMENTO DA DISTÂNCIA.....	47
FIGURA 30: REPRESENTAÇÃO DA VALIDADE DAS LEIS DA REFLEXÃO NO ESPELHO ESFÉRICO.....	49
FIGURA 31: DIAGRAMA DE RAIOS PRINCIPAIS PARA O ESPELHO CÔNCAVO.	50
FIGURA 32: DIAGRAMA DE RAIOS PRINCIPAIS PARA O ESPELHO CONVEXO.....	51
FIGURA 33: FORMAÇÃO DE IMAGEM POR ESPELHO CÔNCAVO.	51
FIGURA 34: PRINCIPAIS TIPOS DE LENTES.	53
FIGURA 35: LENTE CONVERGENTE.	53
FIGURA 36: RAIOS EM UMA LENTE CONVERGENTE.	55
FIGURA 37: RAIOS EM UMA LENTE DIVERGENTE.	55
FIGURA 38: UM MAPA CONCEITUAL PARA A EPISTEMOLOGIA DE LAUDAN.....	61
FIGURA 39: UM MAPA CONCEITUAL PARA A TEORIA DE VIGOTSKY.....	61
FIGURA 40: O <i>CONTINUUM</i> APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E MECÂNICA.	74
FIGURA 41: UM MAPA CONCEITUAL PARA A TEORIA DE APRENDIZAGEM DE DAVID AUSUBEL.....	77
FIGURA 42: UM MAPA CONCEITUAL SOBRE ALGUNS CONCEITOS DA ÓPTICA FÍSICA.	88
FIGURA 43: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA PARA AS FREQUÊNCIAS DAS CATEGORIAS.....	124

RESUMO

Este trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo investigar as possíveis dificuldades na aprendizagem de conceitos da Óptica Física de estudantes de graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para tanto, foram consideradas as principais concepções alternativas já identificadas por outras pesquisas nessa área de conhecimento, descritas no segundo capítulo, e a utilização de mapas conceituais como estratégia didática para superá-las, facilitando a aprendizagem significativa desses conceitos.

Através da aplicação de um questionário do tipo “papel e lápis”, foi possível obter dados que foram analisados quantitativamente. Além disso, foi realizada uma análise qualitativa a partir dos mapas conceituais elaborados pelos alunos, complementada pelas observações em contato com os estudantes, a fim de contribuir nos resultados da pesquisa.

A utilização dos mapas conceituais demonstrou ser de grande auxílio na compreensão acerca de conceitos como polarização, interferência, coerência, difração e luz como onda eletromagnética e suas relações, explicitando as dificuldades e concepções dos alunos, que podiam ser exploradas.

Com emprego desse instrumento, foi possível constatar que a organização e discussão dos conceitos dispostos nos mapas conceituais, permitiram esclarecer e minimizar dificuldades devidas às concepções alternativas, que os estudantes manifestaram para alguns conceitos científicos, como, por exemplo, a polarização linear da luz. Além disso, motivou a participação dos alunos na dinâmica de estudo em sala de aula, durante as discussões dos mapas conceituais.

ABSTRACT

This study was designed to investigate how to overcome possible learning difficulties, regarding optical physics concepts, faced by physics majors of the Federal University of Rio Grande do Sul, Brasil. For such a purpose, misconceptions already identified in this field of knowledge, which are described in chapter two, were taken in account and the concept mapping technique was used as a strategy to help in overcoming them and facilitating meaningful learning of the corresponding concepts.

Through the application of a paper-and-pencil test some data were collected and quantitatively analysed. In addition, a qualitative analysis of the concept maps drawn by the students was carried out, complemented by observations made during the intervention.

The use of concept maps ended up as quite helpful in the understanding of concepts like, polarization, interference, coherence, diffraction, light as an electromagnetic wave, and their relationships, by making explicit students difficulties and conceptions, which could then be dandled.

With the use of this instrument it was possible to verify that the organization and discussion of the concepts in the map helped in clarifying and minimizing the difficulties resulting from misconceptions held by students for some scientific concepts such as, for example, light's linear polarization. Besides, it motivated students to participate in the classroom dynamics.

1 - INTRODUÇÃO

O ensino e a aprendizagem do conhecimento científico não têm apenas o objetivo de cumprir um currículo escolar, mas também de oferecer os subsídios necessários para a compreensão do mundo atual em que vivemos. Cabe ao professor fazer a mediação entre o conhecimento científico e o aprendiz, mas este último deve estar consciente sobre a importância de uma boa formação profissional, científica e cultural, e se predispor a aprender. Porém, o ensino de ciências em nível escolar básico parece apenas cumprir um pré-requisito, mantendo um ensino tradicional, distanciando-se do seu ideal: contribuir para a formação de uma visão crítica para análise e compreensão do mundo moderno (PIETROCOLA, 2001). Na verdade, a problemática existente no ensino de ciências, em particular no de Física, não caracteriza apenas os níveis escolares médio e fundamental, mas também em cursos de formação universitária. O ensino tradicional ainda é amplamente adotado, com a escolha de um livro texto que é rigorosamente seguido, o que acaba por definir o nível do curso e o que vai ser apresentado ao aluno (MOREIRA, 2000). O ensino de Física tem sido investigado por diferentes abordagens teóricas e metodológicas nos últimos anos com o intuito de identificar as dificuldades dos alunos no aprendizado de conceitos científicos, propor novas abordagens, assim como verificar se os instrumentos adotados, como o uso de novas tecnologias, facilita a aprendizagem significativa. Entende-se que o ensino de Física, em sala de aula, não deve se restringir a um único método, na utilização de um único enfoque. Isso se deve, pois, à complexidade

do processo ensino-aprendizagem, já que há a influência de diversos fatores, entre eles, o de abandonar idéias adquiridas no cotidiano, que conflitam com as concepções científicas, não é um evento imediato e depende da vivência de cada indivíduo. Nesse sentido, torna-se evidente que os professores precisam ter e conhecer instrumentos e técnicas didáticas diversificadas para qualificar o ensino de ciências. Pode-se dizer que uma das atribuições da pesquisa em ensino de ciências é a de responder questões pertinentes ao processo ensino-aprendizagem, indicando estratégias didáticas que podem ser implementadas em sala de aula, além de apontar as maiores dificuldades na aquisição de novos conhecimentos. Possivelmente, as concepções alternativas¹, relacionadas aos conceitos científicos, contribuem largamente para dificultar compreensão do conhecimento científico. Algumas investigações realizadas, disponíveis na literatura, abordaram o ensino de Óptica em vários níveis escolares incluindo a formação de professores, identificando as concepções alternativas mais freqüentes entre os alunos e sugerindo estratégias didáticas para promover a mudança conceitual. Entre elas, a utilização dos mapas conceituais é uma forma dinâmica e direta de estudar os conceitos científicos e tem sido identificada como um instrumento eficiente e reconhecido pelos estudantes para a compreensão desses conceitos. Como exemplo, pode ser citada a investigação realizada por Bianchini e Amorim (2005), na qual foram utilizados mapas conceituais em sala de aula com alunos de graduação em Engenharia Elétrica, permitindo identificar as fases do aprendizado. Outra proposta de utilização dos mapas conceituais foi oferecida por Menegolla (2005), como uma forma de reforçar conceitos matemáticos já adquiridos.

Esta dissertação apresenta uma investigação realizada com alunos de graduação em Física que buscou identificar as dificuldades na aprendizagem de conceitos da Óptica Física, enfocando os conceitos de interferência, coerência, difração, polarização linear e

¹ O conceito de “concepção alternativa”, tornar-se-á bem definido ao longo deste trabalho.

luz como uma onda eletromagnética. Não obstante, a investigação enfocou a utilização de mapas conceituais como estratégia didática para facilitar a aprendizagem significativa desses conceitos. A proposta de utilização de mapas conceituais no estudo de conceitos referentes à Óptica Física, visa levar o aluno a abordar os conceitos e suas relações, tratando suas dificuldades e concepções alternativas sobre os conceitos e os efeitos físicos que eles representam, facilitando a aprendizagem significativa desses conteúdos.

Nos capítulos seguintes, são apresentadas, na revisão da literatura, algumas constatações sobre as dificuldades no aprendizado de conceitos científicos, as concepções alternativas dos estudantes, investigadas por pesquisas na área do Ensino de Física, algumas em relação aos conceitos do eletromagnetismo, outras sobre os conceitos da Óptica.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

Ao abordar a temática desta dissertação, e com o objetivo de identificar as investigações existentes sobre o ensino de Óptica Física, área de interesse deste trabalho, foram feitas consultas em diversos artigos publicados em atas de conferências internacionais e em diversas revistas especializadas em Ensino de Ciências tais como: Revista Brasileira de Ensino de Física; Revista Investigações em Ensino de Ciências; Ciência & Educação; Caderno Brasileiro de Ensino de Física, American Journal of Physics, Journal of Research in Science Teaching, Revista de la Enseñanza de la Física, Science Education, Enseñanza de las Ciencias.

Neste capítulo, é apresentada a revisão de literatura que realizada para esse estudo, focalizando as investigações sobre as principais concepções alternativas² sobre conteúdos da Óptica, identificadas em alunos dos níveis fundamental, médio e superior. Inicialmente e com o intuito de contextualizar este trabalho, serão apresentadas algumas dificuldades dos alunos no aprendizado de conceitos científicos, em alguns conteúdos da Física. Em seguida, serão abordadas as principais concepções alternativas em Óptica. Além disso, também serão apresentadas algumas utilizações dos mapas conceituais no Ensino de Ciências, bem como a descrição minuciosa sobre esse instrumento de estudo e organização de informações.

² O conceito de concepção alternativa será definido claramente ao longo deste capítulo.

2.1 - O Ensino de Física e as dificuldades que os estudantes têm na compreensão de conceitos científicos

A Física, em muitas ocasiões, parece ser apresentada como algo distante do cotidiano e de conhecimento inquestionável. As leis científicas parecem ser consideradas verdades absolutas, que descrevem a natureza de forma exata. A maneira com a qual o conhecimento científico é divulgado na mídia popular³ pode induzir esse tipo de concepção. Nossa cultura parece não deixar espaço à preparação para o ensino do conhecimento científico, chegamos à *escola formal* com concepções sobre a natureza baseadas nas crendices que se apresentam em nossa experiência diária, comumente passadas para gerações seguintes. Além disso, desde muito cedo, somos acostumados a conceber a Física, a Química e a Matemática como disciplinas muito difíceis para aprender, gerando uma espécie de repulsa em estudá-las. Talvez, mais crítico seja com os conteúdos de Física, pois há alunos que solucionam equações matemáticas, por exemplo, do tipo polinômios de quarta ordem, mas não conseguem resolver uma equação linear em um problema de Física, quando, em muitos casos, é pura aplicação de fórmulas. Não obstante, as pesquisas em ensino de Física revelam as dificuldades que os alunos se deparam na compreensão dos vários conceitos científicos pertinentes a essa área e a falta de domínio do ferramental matemático (YAMAMOTO e BARBETA, 2002), fundamental para a explicação e análise dos fenômenos físicos. Verifica-se que os estudantes universitários, no ensino de conceitos do eletromagnetismo, apresentam dificuldades em compreender, por exemplo, a Lei de Ampère, confundindo, inclusive, as relações matemáticas envolvidas, no que se refere à curva amperiana e superfície gaussiana (MOREIRA e PINTO, 2003). Tais dificuldades também podem estar fortemente ligadas à

³ Entende-se por *mídia popular*, os noticiários vespertinos, os jornais mais comuns disponíveis à população, etc.

dificuldade de construir modelos mentais⁴ para os campos elétrico e magnético, já que são conceitos que, talvez, possuam um grau de abstração mais elevado do que os conceitos ligados à mecânica newtoniana. Desse fato, poder-se-ia esperar que as concepções alternativas estivessem mais relacionadas aos conceitos da mecânica, já que eventos como um objeto em movimento são facilmente observados na experiência do cotidiano. Entretanto, verifica-se que os alunos também usam, freqüentemente, raciocínios baseados no senso comum para tratar problemas que envolvem o conceito de campo, indicando um nível pequeno de amadurecimento intelectual sobre o assunto (GUISASOLA et al, 2003). É possível que a dificuldade em lidar com as equações matemáticas esteja muito relacionada à falta de entendimento conceitual do que elas representam. A falta de conexão entre o modelo conceitual e o matemático para um fenômeno físico pode gerar para o aluno confusões cognitivas que, possivelmente, aumentam a sua dificuldade na resolução de problemas, tal como o caso descrito anteriormente, no qual há conflito entre expressões matemáticas. Em outros casos, existe a possibilidade de o aluno resolver, por exemplo, um cálculo integral, mas sem atribuir qualquer significado físico ao resultado obtido. Se o aluno tem clareza conceitual sobre o que representa o modelo matemático, provavelmente não confundirá as equações.

O estudo realizado por Velazco e Salinas (1998)⁵ sobre a compreensão dos conceitos de campo, energia e potencial elétricos e magnéticos, revelou a necessidade de que as aulas habituais sobre esses conteúdos, que são ministradas com grande enfoque nas equações matemáticas, sejam modificadas no sentido de haver uma abordagem mais conceitual. Uma proposta de ensino para os conceitos de campo elétrico e de campo magnético é o uso da História da Física, de como esses conceitos foram sendo

⁴ O conceito de modelo mental usado é compatível com a teoria de Johnson-Laird, porém, não é objetivo deste trabalho oferecer um aprofundamento maior sobre tal abordagem. Para maiores detalhes, ver, por exemplo, Moreira (2004).

⁵ Estudo realizado no ano de 1998, VELAZCO e SALINAS, 2001.

desenvolvidos, não no sentido de redescoberta da Ciência, mas utilizando-a como um organizador prévio (MAGALHÃES, SANTOS & DIAS, 2002). Além das dificuldades na compreensão dos conceitos físicos e do domínio matemático, cabe comentar que a interpretação de gráficos, que podem representar o comportamento de um determinado evento físico, também é problemática (YAMAMOTO e BARBETA, 2002). Nesse sentido, ao abordar o processo ensino-aprendizagem, também surgem questões em relação à linguagem utilizada pelo professor, ou seja, como o docente ensina e como o aluno aprende. O uso de gráficos é amplamente adotado tanto em sala de aula como em aulas de laboratório; se o aluno não domina a análise gráfica, provavelmente esse instrumento não contribuirá para a aprendizagem significativa. Tanto no ensino médio como em cursos de graduação, a discrepância entre a percepção do aluno e a do professor, em relação ao conteúdo apresentado, pode ser muito grande. Isso pode representar um problema para o ensino tradicional, no qual o professor apenas apresenta os conceitos e as relações matemáticas envolvidas em uma determinada teoria, assim como alguns exemplos fundamentais, esperando que o aluno consiga ter capacidade suficiente de generalização e abstração para aplicar a teoria científica estudada em situações novas (MCDERMOTT, 1996). Certamente, as dificuldades no aprendizado de conceitos científicos não se restringem somente ao que foi apresentado até aqui, existem investigações sobre os vários outros tópicos da Física, os quais não serão comentados para não haver desvio do escopo deste estudo.

No que se refere ao ensino de conceitos da Óptica, os estudos que foram encontrados tratavam de verificar se o uso de materiais desenvolvidos para as aulas (*kits* para experimentação em sala de aula) contribui para o ensino da Óptica no nível médio, ou analisavam as concepções alternativas sobre os conceitos da Óptica Geométrica e da Óptica Física. No Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo

(USP), foram desenvolvidos dois tipos de “kits” para serem usados no ensino médio: um para o professor fazer demonstrações, e outro para os alunos manipularem, ambos envolvendo o ensino da Óptica Geométrica em sala de aula (CATUNDA, 2004). Um estudo realizado pelo departamento de Física da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) procurou identificar a origem das concepções alternativas sobre a natureza da luz durante o período de escolarização em nível médio e fundamental. Com a aplicação de um questionário, que versava sobre a natureza da luz, foram investigados 88 alunos da oitava série e 114 alunos do terceiro ano do nível médio. Após a coleta dos dados, foram identificados quatro tipos de concepções sobre a constituição da luz: constituída por energia, raios, ondas e por partículas. Entretanto, na continuidade dessa investigação, quando o conceito de reflexão foi abordado, verificou-se que a concepção de que a luz é um conjunto de raios é mais predominante entre alunos do nível médio, sugerindo que a apresentação da Óptica Geométrica, comumente feita antes das aulas sobre os efeitos ondulatórios da luz, reforça tal concepção, já que os resultados obtidos para os alunos da oitava série revelaram que a concepção de partículas de luz é predominante, ainda que apenas um pouco mais do que o conceito de raios de luz. Esse resultado reforça a constatação de um estudo anterior que identificou a concepção de luz constituída por raios de forma predominante; concepções como o caráter ondulatório e corpuscular são, em geral, desconhecidas (DE PAULO et al, 1995 apud DE PAULO, DE PAULO & RINALDI, 1997).

Atualmente já não há mais novidade na discussão sobre o quanto as concepções alternativas influenciam a aprendizagem de conceitos científicos, originadas no conhecimento do senso comum e, algumas vezes, reforçadas por analogias inadequadas em sala de aula. Das várias pesquisas realizadas, mas, ainda com enfoque atual, prevalece a importância da influência que essas concepções têm no processo ensino-aprendizagem, na

mudança conceitual, na atribuição de significados aos conceitos científicos, que, freqüentemente, entram em conflito com o conhecimento prévio do aluno, podendo este ser muito resistente à mudança conceitual, por ser composto de “*concepções alternativas aprendidas de modo significativo*” (MOREIRA e GRECA, pg. 305, 2003).

2.2 - Concepções alternativas em Óptica

O ensino de Ciências, em qualquer nível de instrução, pode sofrer influência das pré-concepções errôneas que os alunos levam para a sala de aula. Esse conhecimento prévio, equivocado, sobre os conceitos científicos, é denominado concepção alternativa. Em outras palavras, concepções alternativas são significados contextualmente errôneos, não compartilhados pela comunidade científica (SILVEIRA, 1993). É possível que essas concepções sejam reforçadas em sala de aula, por exemplo, pelo uso de metáforas inadequadas por parte do professor. A partir disso, torna-se evidente a importância de salientar as concepções alternativas para os professores de Ciências, em particular aos de Física, a fim de que direcionem o ensino à mudança conceitual e não ao reforço dessas pré-concepções. As pesquisas realizadas permitem identificar essas concepções, revelando o que os alunos pensam em relação aos conceitos científicos, tanto antes como após a instrução formal.

O estudo realizado por Wosilait (1999), do Departamento de Física da Universidade de Washington, abordou as dificuldades dos estudantes em aplicar o modelo ondulatório da luz para os efeitos de interferência e difração. A coleta dos dados foi realizada através da aplicação de um questionário em 1200 estudantes do curso introdutório de cálculo básico, em situação de pré-teste, e outra aplicação, como pós-teste, porém em 560 estudantes desse mesmo curso. O teste também foi aplicado a 95 alunos de graduação. De todas as atividades dessa investigação, realizadas com esses alunos, cabe destacar as concepções

alternativas que foram identificadas: em relação ao efeito da difração, alguns interpretam esse fenômeno como apenas um efeito de borda; outros não compreendem corretamente a relação entre o tamanho da fenda em um anteparo e o comprimento de onda " λ " da luz incidente, acreditam que se a largura da fenda for menor do que " λ " a luz não pode passar. Para o efeito da interferência, a grande dificuldade dos alunos foi a relação entre o comprimento de onda e a fase de oscilação, ou seja, tinham dificuldade em identificar quando havia um máximo de interferência ou um mínimo, a partir de questões que envolviam os conceitos de fase, comprimento de onda e diferença de caminho óptico.

Gircoreano e Pacca (2001), considerando as dificuldades no aprendizado da Óptica Geométrica, apresentaram uma estrutura de um curso para o nível médio, baseado nas concepções alternativas dos alunos sobre luz e visão. A estrutura do curso é composta, basicamente, por três etapas: a) Preparação – consiste na detecção das concepções alternativas, utilizando, por exemplo, um questionário; b) Desenvolvimento – apresentação de situações-problema, destacando algum conceito físico, que entre em conflito com a pré-concepção e c) Formalização – discussão com os alunos sobre a atividade realizada, confrontando as expressões utilizadas pelos alunos antes e depois da etapa anterior. No início desse estudo, foi aplicado um questionário a 120 alunos do segundo ano do ensino médio, a fim de identificar as concepções alternativas, cujas respostas puderam ser discutidas com os alunos, facilitando a identificação dessas pré-concepções. Neste estudo, foram identificadas as seguintes concepções: “banho de luz”; “raios visuais”; cores como propriedades dos objetos (objetos de cores claras podem ser vistos no escuro, sem incidência da luz); imagem contida na superfície do espelho.

As concepções alternativas, em muitos casos, são deveras resistentes à mudança conceitual, mas, além disso, podem ser reforçadas, conforme já sugerido, mesmo durante o

ensino formal. Essa possibilidade é corroborada pelo trabalho realizado por Cudmani e Pesa (1999), uma oficina de formação e atualização de docentes, envolvendo quinze professores de Física, que responderam algumas questões sobre ondas em geral e ondas eletromagnéticas em particular. Os professores apresentaram dificuldades em responder adequadamente sobre alguns conceitos envolvidos em questões dissertativas. Frente à questão sobre a onda luminosa⁶ ser transversal ou longitudinal, quatro professores optaram pela segunda alternativa, mas não souberam fundamentar suas respostas. Apenas três relacionaram o caráter transversal ao efeito de polarização, mas não souberam explicar adequadamente suas respostas. Quando questionados sobre polarização das ondas luminosas, quatro professores manifestaram a concepção de que esse efeito se refere a uma limitação na direção de propagação; três professores confundiram polarização com monocromaticidade total ou parcial, sendo que, apenas dois professores deram respostas cientificamente corretas, as demais, foram respostas muito confusas.

Essas concepções apresentadas por professores de Física, provavelmente são repassadas em sala de aula, quando estão com seus alunos. Obviamente, tal situação não pode ser generalizada, mas o fato é que existem ocorrências graves: São professores que “ensinam” concepções alternativas ?

Os estudos apresentados até o momento, são exemplos de vários outros que foram realizados abordando os conceitos da Óptica. A descrição de cada um deles seria algo demasiado. Portanto, por uma questão de parcimônia, as concepções alternativas e suas características, foram reunidas nas páginas seguintes, sem entrar no mérito da descrição das pesquisas que as identificaram. Portanto, no próximo subcapítulo, as principais

⁶ Considera-se *onda luminosa* qualquer onda eletromagnética pertencente a faixa visível do espectro eletromagnético.

concepções alternativas, em relação aos conceitos da Óptica, são apresentadas em conjunto com alguns comentários sobre as teorias e conceitos cientificamente aceitos.

2.2.1) Natureza e propagação da luz

A luz é uma onda eletromagnética de propagação retilínea (meios homogêneos) com altíssima velocidade ($\approx 3 \times 10^8$ m/s) de alcance infinito no vácuo. Em 1657, Pierre de Fermat encontrou um novo método para determinar a trajetória dos raios luminosos, baseado na idéia de que a natureza atua sempre pelo caminho temporalmente mais curto, ou seja, de todos os caminhos possíveis para ir de um ponto ao outro, a luz segue aquele que é percorrido no tempo mínimo, o conhecido Princípio de Fermat. Como a velocidade da luz é uma constante, decorre que o tempo mínimo equivale a caminho óptico mínimo e, portanto, à distância mínima (válido para meios homogêneos), ou seja, o Princípio de Fermat equivale à propagação retilínea da luz (NUSSENZVEIG, 1998). Entretanto, facilmente se percebe os limites desse modelo (raio de luz) ao considerarmos os efeitos ondulatórios da luz. A teoria ondulatória da luz sugerida por Christian Huygens em 1678, explica os efeitos da refração e reflexão em termos de ondas e atribui um significado físico ao índice de refração, como sendo a razão entre a velocidade da luz no espaço livre (a constante “c”) e a velocidade de propagação da onda em um meio. Além disso, permite-nos estudar os efeitos de interferência e difração das ondas luminosas. O princípio fundamental da teoria ondulatória de Huygens é a seguinte:

Todos os pontos de uma frente de onda funcionam como fontes pontuais para ondas secundárias. Depois de um tempo t , a nova posição da frente de onda será dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

Entretanto, foi James Clerck Maxwell quem mostrou que o estudo da “luz visível”, abordado na Óptica, é um ramo do Eletromagnetismo, pois um feixe de luz é uma

configuração dos campos elétrico e magnético que se propagam, definindo a luz como onda eletromagnética. A partir de suas equações, Maxwell deduziu a equação da onda, satisfeita pelos campos elétrico e magnético, com velocidade de propagação da luz:

Partindo das equações

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla_x \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Onde “ μ_0 ” é a constante conhecida como permeabilidade do vácuo e vale exatamente $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. A constante “ ϵ_0 ” é denominada permissividade do vácuo e seu valor é $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

Aplicando o rotacional na equação da esquerda,

$$\nabla_x(\nabla_x \vec{E}) = -\nabla_x \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla_x \vec{B} \quad \longrightarrow$$

$$\nabla_x(\nabla_x \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Usando a identidade vetorial $\nabla_x(\nabla_x \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$, e o fato de que $\rho = 0$ ($\nabla \cdot \vec{E} = 0$)

no vácuo:

$$-\nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \Rightarrow \nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{onde } C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Equação da onda no espaço livre.

A mesma demonstração pode ser desenvolvida para o campo magnético. A equação da onda demonstra que o campo elétrico oscilante se propaga no vácuo com a velocidade da luz (FOWLES, 1989).

Contudo, em 1905, Albert Einstein sugeriu uma nova teoria para o tratamento da luz e citou o efeito fotoelétrico como uma de suas aplicações. De acordo com essa teoria, a radiação eletromagnética tem sua energia quantizada em pacotes concentrados, os quais, algum tempo depois, foram chamados de *fótons*. Com esse novo tratamento para a luz, foi

possível explicar os efeitos observados por Heinrich Hertz, até então inexplicáveis pela teoria ondulatória da luz, que em suas experiências com ondas eletromagnéticas, por volta de 1886, constatou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorria mais facilmente quando estes eram iluminados pela luz violeta. Essa descarga é facilitada pela emissão de elétrons do catodo devido ao ganho de energia da luz incidente, sendo arrancados da superfície do material, conforme demonstrado por Lenard, ao seguir alguns experimentos de Hallwachs. Tal efeito, a emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz, é o já citado efeito fotoelétrico (EISBERG, 1979). Dessa forma, a luz apresenta um comportamento dual, possuindo propriedades ondulatórias e de partícula: propaga-se como uma onda eletromagnética, mas interage com a matéria como partícula. A combinação dessas duas teorias resulta na Óptica Quântica.



As principais concepções alternativas identificadas, relacionadas à natureza e propagação da luz são:

a) *A luz se vê*

A visibilidade da luz, independente do meio, é uma concepção detectada em várias pesquisas realizadas. Os alunos consideram que a luz pode ser observada sem que esteja incidindo nos olhos do observador. Não consideram que a luz é refletida em várias direções por partículas suspensas no ar. Provavelmente, tal concepção surja de forma natural no cotidiano, quando a experiência diária não oferece a propagação no espaço livre.

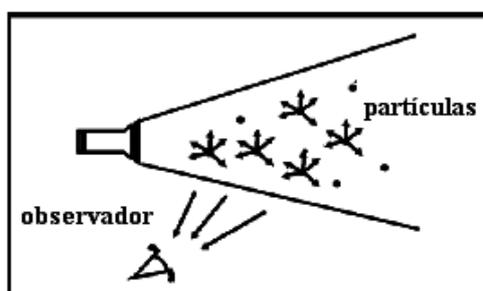


Figura 1: Visualização das partículas suspensas no ar.

Se a luz produzida pela lanterna da figura 1 estivesse propagando no vácuo, não haveria reflexões e não poderíamos perceber a luz, na posição do observador.

b) Alcance finito da luz

Quanto maior a intensidade da fonte, maior será o alcance da luz, independentemente se existe ou não perda de energia no meio de propagação. Alguns alunos acreditam que a luz se propaga por uma distância maior no escuro do que em um ambiente claro. Essa concepção alternativa viola um dos princípios fundamentais da Física: a conservação da energia. Pois, independentemente da intensidade da fonte, o alcance da luz, no espaço livre, é infinito; não existe meio para absorver a energia eletromagnética.

c) Raios paralelos

Alguns estudantes confundem propagação retilínea (figura 2-II) com propagação paralela (figura 2-I), considerando somente a emissão de raios paralelos. Uma das possíveis causas para esta concepção alternativa é a representação de raios paralelos para fontes distantes descritas em livros didáticos. Nestas descrições nem sempre é explicitado que se pode considerá-los paralelos para distâncias suficientemente grandes do observador à fonte, de forma que o ângulo entre os raios luminosos seja desprezível, ou seja, próximo a zero. Descrições desse tipo são comumente realizadas durante o estudo de formação de imagens em lentes e espelhos esféricos. Possivelmente, o aluno memoriza a imagem dos raios paralelos que incidem, por exemplo, no espelho côncavo, e aplicam esse modelo em qualquer caso que ocorra a propagação da luz.

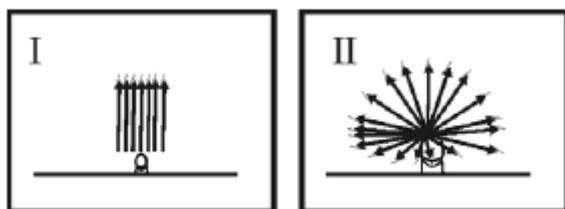


Figura 2: Representação dos raios paralelos (I) e a mais adequada nessa abordagem (II).

d) Raios lanterna

Os alunos acreditam, erroneamente, que seja emitido um raio somente de cada ponto da fonte (figura 3-I), ao invés de cada ponto emitir em todas as direções (figura 3-II). Uma das razões para esta concepção pode ser a forma com a qual os livros representam a emissão de raios por uma fonte. Nessas representações não está explícito que são utilizados apenas os raios relevantes para a situação em questão.

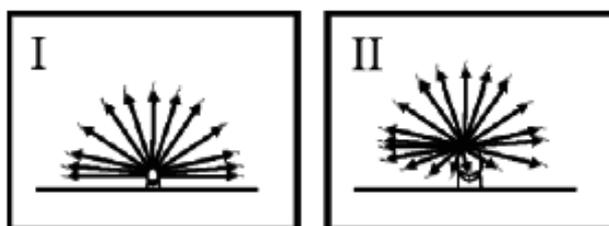


Figura 3: Representação dos raios lanterna (I) e a científica (II).

e) Conceitos separados de luz

Luz solar e luz artificial são interpretadas como tendo naturezas diferentes. Alguns consideram luz solar como “luz natural”. Tal concepção pode estar sendo reforçada durante as aulas, quando o professor faz referência à luz de uma lâmpada como artificial. Deve-se enfatizar que tal denominação é adotada apenas por ser produzida por um dispositivo construído pelo homem, mas que é luz tão natural quanto do Sol.

f) Banho de luz:

A luz é entendida como um ente estático, que ocupa todo o espaço, envolvendo os objetos, permitindo que sejam vistos pelo observador, sem haver relação alguma entre o olho do observador e a luz que chega nele.

2.2.2) Formação de imagens e sombras

Um objeto opaco colocado entre a fonte e um anteparo (figura 4), interrompe a passagem de parte da luz, originando a sombra. O contorno desta sombra é definido pelas retas que saem da fonte e tangenciam o objeto (ALVARENGA, p. 708, 1993). Um objeto (luminoso ou iluminado) quando colocado em frente a um orifício emite luz em todas as

direções de cada ponto. Um estreito feixe que parte de cada ponto passa através do orifício, dando origem a uma imagem semelhante a ele, mas invertido (figura 5).

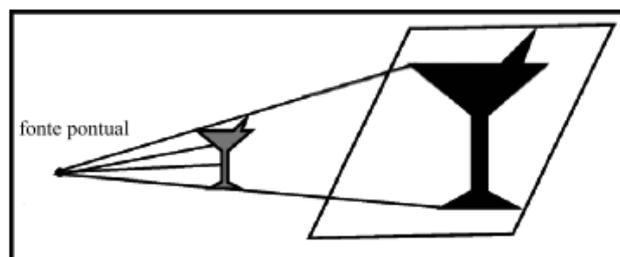


Figura 4: Formação da sombra de um objeto iluminado por uma fonte pontual.

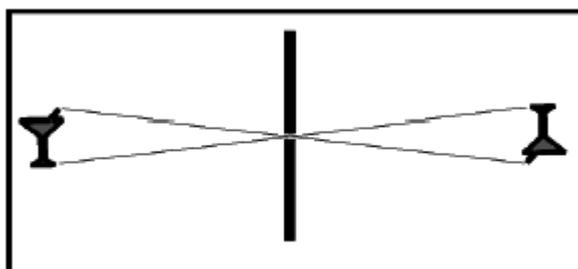


Figura 5: Formação da imagem de um objeto por um orifício.

As concepções alternativas referentes à formação de imagens e sombras são:

a) *Sombras com o mesmo tamanho do obstáculo*

Nesta concepção, os estudantes utilizam os raios paralelos para justificar o tamanho da sombra, desconsiderando totalmente a situação representada na figura 4. Talvez, estejam utilizando o mesmo raciocínio quando traçam raios na formação de imagens em espelhos planos, nos quais a imagem tem o mesmo tamanho do objeto.

b) *Imagens e sombras determinadas somente pelo tamanho e forma dos orifícios e obstáculos*

Desprezando que em um sistema óptico existem as relações entre as características e dimensões do seu conjunto (distância objeto-orifício, orifício-objeto, tamanho do orifício, etc.). Esses modelos alternativos são tipificados, segundo Pesa (1999), como:

- **modelo de “encaixe”**: É um modelo de ajuste. Todos os raios emitidos pela fonte que “encaixam” através do orifício ou que são bloqueados pelo obstáculo, chegam ou não no anteparo. A imagem será a porção que passou pelo orifício
- **modelo de “aperto”**: A luz viaja como um todo até o orifício, estreita-se e logo se abre. Assim explicam a câmara escura e a formação da imagem com a forma da fonte.
- **modelo de “disparador”**: Quando a luz atinge o objeto, este dispara uma sombra. Atribuem à sombra como sendo uma entidade física distinta, com existência concreta e característica similar a dos objetos, não sendo, simplesmente, a ausência da luz.

2.2.3) Cores

O Sol emite radiação eletromagnética e, uma parte dessa radiação, compreende o espectro visível. A soma de todos os comprimentos de onda localizados na região visível do espectro eletromagnético resulta na luz branca. Ela também pode ser obtida somando-se as luzes vermelha, azul e verde, denominadas *cores primárias*. Quando duas das três cores primárias da luz são combinadas, tem-se:

Azul + verde = ciano
 Vermelho + verde = amarelo
 Vermelho + azul = magenta

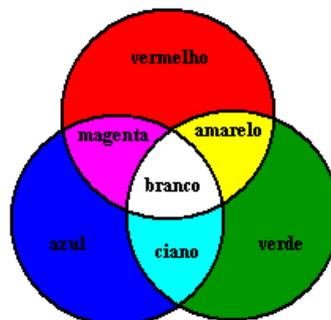


Figura 6: Resultado da adição das cores primárias da luz.

Se duas cores combinadas produzem a luz branca são chamadas *cores complementares*:

Magenta + verde = branco
Amarelo + azul = branco
Ciano + vermelho = branco

Dispersão

É possível, facilmente, verificar que a luz branca é composta pela combinação de todas as ondas luminosas, fazendo a luz incidir em um meio dispersivo. Ao incidir um feixe de luz policromática sobre um meio transparente, surgem raios refratados de diversas cores. Esse fenômeno de separação da luz policromática nas cores que a constituem é denominado *dispersão*.

Para a maioria das substâncias transparentes, a dispersão ocorre, pois o índice de refração é uma função inversamente proporcional ao comprimento de onda “ λ ”. Tende, portanto, a aumentar com a frequência da luz incidente. Por essa razão, a luz violeta sofre um desvio maior do que a luz vermelha ($\lambda_{\text{violeta}} \cong 400 \text{ nm}$ e $\lambda_{\text{vermelha}} \cong 700 \text{ nm}$). Destaque-se que essa aproximação nem sempre é válida. Em estudos mais detalhados sobre o índice de refração, pode-se verificar casos de dispersão “anômala” em que o desvio é maior para comprimentos de onda maiores, ou seja, há um decréscimo do índice de refração à medida que ocorre o aumento da frequência (Fowles, 1989).

Usualmente, utiliza-se um prisma para decompor a luz policromática, pois ele provoca duas dispersões, uma em cada superfície de separação com o ar.

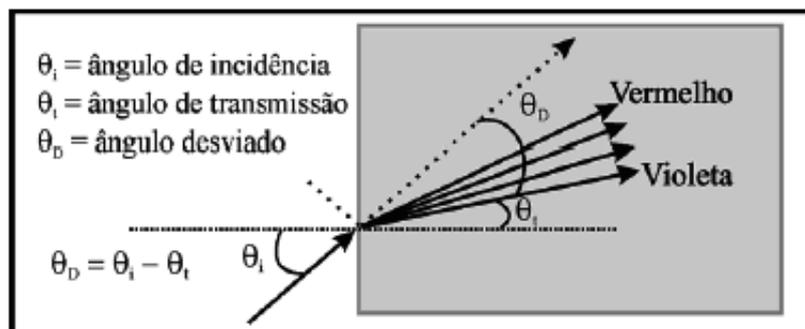


Figura 7: Representação da dispersão.

As concepções alternativas mais freqüentes para o conceito de cor são:

a) *A luz colorida é ativa*

Luz colorida atua no objeto de uma forma vigorosa, pois pode alterar a cor do objeto de duas formas: somando cores ou “escurecendo” o objeto, ou impedindo a cor “verdadeira” de ser visualizada. Ela também pode dar cor à sombra. A função da luz branca “normal” é passiva, pois ela é clara, sem cor, transparente e, simplesmente, ilumina o objeto ou a sombra para podermos ver sem provocar mudanças.

b) *A luz colorida contém cor*

Esta cor pode se misturar com a cor do objeto e mudá-lo, como pigmentos podem se misturar e criar novas cores. Ela também pode se combinar com a cor de outra luz para criar sombras de uma nova cor.

c) *A luz colorida é escura*

O termo escuro é usado com dois significados: como o oposto do claro, e como uma característica de cada cor (algumas cores são mais escuras que outras), quando ela é usada da segunda forma, o termo escuro indica uma escala de brilho de uma cor, por exemplo, a luz vermelha é mais escura que a amarela e assim por diante, em uma escala que vai do branco ao preto.



2.2.4) Reflexão

Quando uma onda que se propaga em um meio de índice de refração n_1 encontra a interface com outro meio de índice de refração n_2 , e sofre mudança na direção de propagação, mas permanece no meio 1 (caso em que $n_2 > n_1$), diz-se que a onda incidente foi totalmente refletida. Em algumas situações, a onda incidente pode passar para o meio 2, sendo parcialmente refletida e refratada, quando, por exemplo, incide em uma placa de vidro, conforme representado na figura 8. A reflexão pode ocorrer na forma especular ou

difusa. A reflexão especular é quando o feixe incidente encontra uma superfície lisa sendo o feixe refletido bem definido.

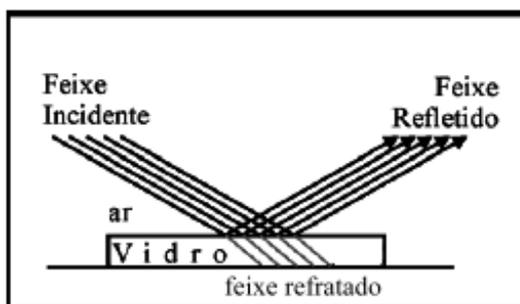


Figura 8: Reflexão especular.

A reflexão difusa é quando um feixe de luz incide sobre uma superfície não-homogênea (figura 9). Nesse caso, cada pequena porção da superfície reflete a luz em uma determinada direção e, conseqüentemente, o feixe refletido não é bem definido, observando-se o espalhamento da luz em várias direções (ALVARENGA, p. 712).

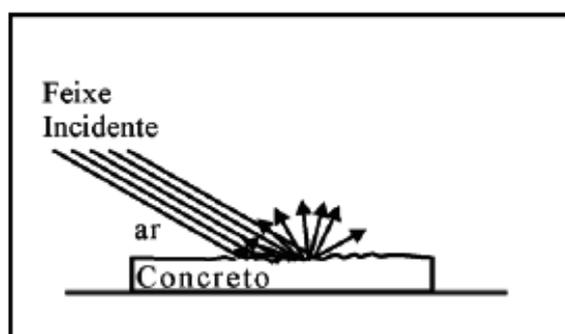


Figura 9: Reflexão difusa.

Na figura 10 um raio luminoso incide sobre o ponto “O” de uma superfície refletora. Traçando-se a normal⁷ nesta superfície e no ponto em questão, observa-se que os raios incidente e refletido definem um plano. A reflexão ocorre de tal maneira que o raio refletido está sempre no mesmo plano que contém o raio incidente. Portanto, o raio incidente, o refletido e a normal estão todos contidos no mesmo plano. Tal fato é conhecido como a *1ª lei da reflexão*.

⁷ Reta perpendicular à superfície.

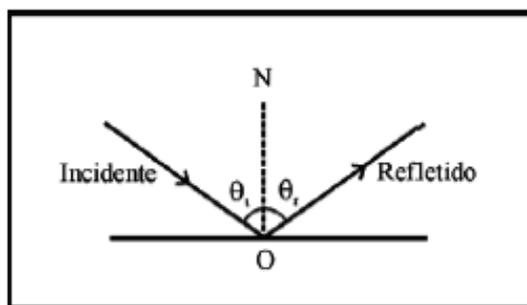


Figura 10: Representação da 1ª lei da reflexão.

O ângulo θ_i que o raio incidente faz com a normal é denominado *ângulo de incidência*, e o ângulo θ_r , formado entre a normal e o raio refletido, é chamado de *ângulo de reflexão*. De acordo com a 2ª lei da reflexão, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, ou seja, $\theta_i = \theta_r$.



As principais concepções alternativas detectadas referentes à reflexão são:

- a) *A reflexão da luz ocorre somente na forma especular*

As diferenças entre os feixes refletidos devem-se aos diferentes graus de absorção da radiação luminosa nas superfícies. Na maioria das justificativas se identifica um alto “coeficiente de reflexão” dessas superfícies. Os estudantes não consideram o processo de interação entre a luz e os objetos, quando a palavra reflexão não aparece explicitamente. A interpretação dominante para explicar o comportamento da luz em um recinto é a seguinte: “a luz sai da fonte e cai nos objetos”. Esta pré-concepção provém de um processo de aquisição de conceitos a partir de experiências prévias: com espelhos pode-se desviar a luz, porém os objetos opacos o efeito mais significativo tem lugar no mesmo objeto, podem ser observadas “zonas iluminadas”. Espera-se, então, que os estudantes frequentemente desconheçam a possibilidade de um objeto rugoso refletir a luz e identificar reflexão como sinônimo somente de reflexão especular (PESA, CUDMANI e BRAVO, 1995).

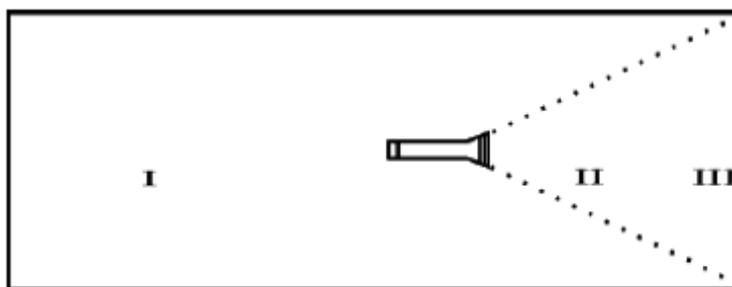


Figura 11: Lanterna iluminando uma parede de uma sala fechada.

A justificativa dos estudantes para esta concepção quanto a possibilidade de haver luz na região I é uma “violação da propagação retilínea da luz”, pois a luz não pode dobrar-se para iluminá-la.

b) *Raios visuais*

No processo da visão pode-se identificar muitos problemas que, não raro, decorrem da dificuldade em reconhecer e aplicar corretamente as propriedades da propagação da luz. É comum o estudante considerar, que, para ver um objeto, não é necessário que venha luz do objeto até nossos olhos. Alguns estudantes apresentam de modo muito arraigado o modelo dos “raios visuais”, proposto por Aristóteles, para explicar o processo da visão.

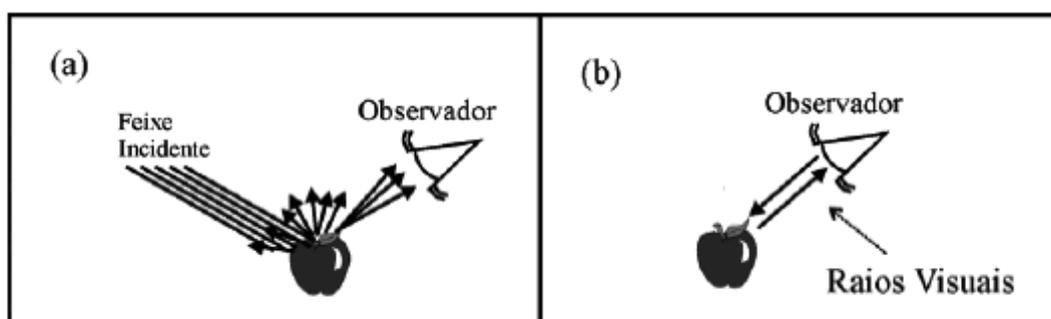


Figura 12: Visualização de um objeto utilizando os conceitos científicos (a); raios visuais (b).



2.2.5) Refração

Ao fazer um feixe de luz incidir sobre uma superfície transparente lisa, que separa dois meios diferentes, parte desse feixe de luz incidente volta ao meio de origem (raios refletidos) e parte penetra no segundo meio (raios refratados). O efeito da refração consiste

em uma aparente⁸ mudança da velocidade de propagação do feixe luminoso ao penetrar em um meio com diferente índice de refração, ocorrendo mudança na direção de propagação quando o feixe incide obliquamente.

A lei da refração é denominada a Lei de Snell e tem a forma

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

Onde n_1 e n_2 são os índices de refração de cada meio, θ_i é o ângulo de incidência e θ_t é o ângulo de um raio refratado, em relação à normal “N” na figura 13:

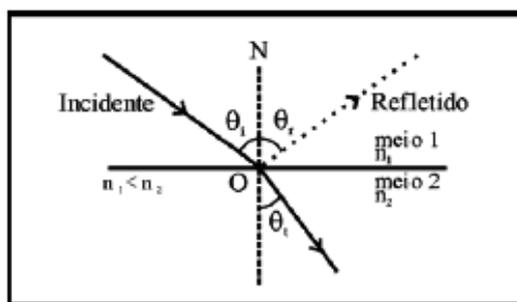


Figura 13: Representação da refração.

Reflexão interna total

Em uma transmissão em que $n_1 > n_2$ (índices de refração dos meios 1 e 2, respectivamente), conforme representado na figura 14, à medida que o ângulo de incidência θ_i é aumentado, o ângulo de refração também aumenta até ser alcançado um valor de ângulo crítico θ_c em que o ângulo de refração é de $\pi/2$. Se o ângulo de incidência for maior do que o ângulo crítico θ_c , a luz incidente é totalmente refletida, caracterizando a *reflexão interna total*. Tal efeito torna possível, por exemplo, a utilização de fibras ópticas para a transmissão de dados.

O ângulo crítico θ_c pode ser determinado, sabendo-se os índices de refração n_1 e n_2 , a partir da Lei de Snell:

⁸ Mais detalhes sobre a origem do índice de refração pode ser obtido em: Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. Lectures on Physics.

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \qquad \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

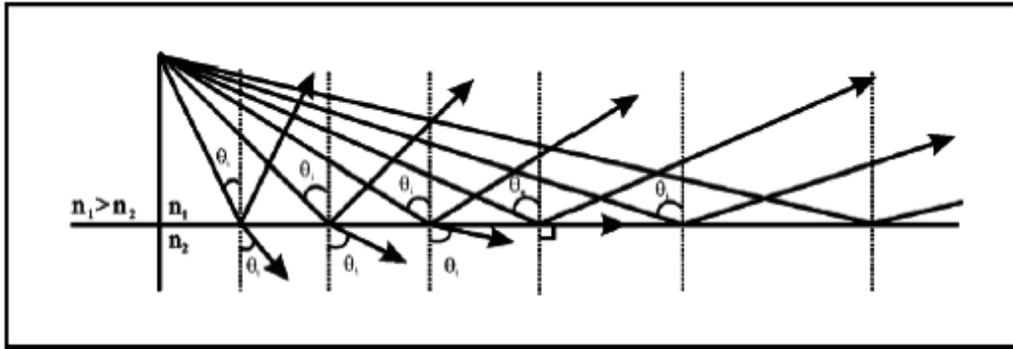


Figura 14: Reflexão interna total.



As concepções alternativas em relação ao conceito de refração são as seguintes:

a) *Refração e reflexão são fenômenos sem relação*

Quando há reflexão não há refração e vice-versa, independentemente de onde ocorre o fenômeno.

b) *Refração e a dispersão são fenômenos distintos*

Não consideram a refração como sendo consequência da dispersão, por isso quando ocorre refração não pode ocorrer dispersão ou o inverso.

c) *Prisma como sumidouro*

O raio incidente em um prisma sempre sofre reflexão interna total. O ângulo de incidência na segunda face do prisma não é verificado para testar a possibilidade de reflexão interna total. Dessa forma, não saíam raios do prisma e, portanto, não ocorre refração.

d) *Refração necessita de ar*

Consideram que a refração ocorre somente do ar para outro meio, descartando a possibilidade de ocorrer tal efeito entre meios distintos, sem haver, necessariamente, a existência de ar.

2.2.6) Difração

A difração é o fenômeno em que as ondas contornam obstáculos e atravessam orifícios, sofrendo modificação na sua frente de onda. Para que esse fenômeno seja facilmente observado, é necessário que os obstáculos e as fendas tenham dimensões da ordem do comprimento de onda “ λ ”. Por esse motivo, a difração da luz visível ($\lambda_{\text{luz}} = 400 - 700 \text{ nm}$) torna-se praticamente imperceptível no nosso cotidiano, diferentemente da difração sonora, pois o seu comprimento de onda é muito maior do que o da luz visível.

A equação que permite localizar os mínimos de intensidade em uma figura de difração tem a seguinte forma:

$$a \sin \phi = m \lambda$$

Onde “ a ” é a largura da fenda e

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

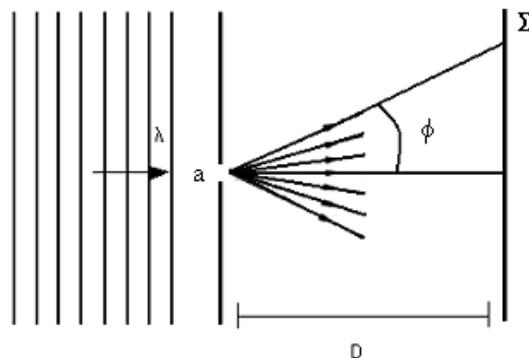


Figura 15: Incidência de onda plana.

A figura 15 representa a incidência de uma onda plana monocromática em uma fenda de largura “ a ”, sofrendo o efeito da difração no lado direito da figura. No anteparo “ Σ ”, surgem as franjas da figura de difração. O ângulo “ ϕ ” é o afastamento angular entre um mínimo de difração e a posição do máximo central, identificado em “0”.

A partir da equação do 1º mínimo ($\sin \phi = \lambda/a$), verifica-se que “ $\sin \phi$ ” varia inversamente com a largura “ a ” da fenda, por isso, ao diminuir a largura da fenda o ângulo ϕ aumenta, o que provoca um alargamento no máximo central da figura de difração.

Fazendo “ $a = \lambda$ ”, resulta “ $\phi = \pi/2$ ”, e o máximo central é largo o suficiente para não observarmos os mínimos da figura de difração.

Na figura 16 está representada a imagem de difração produzida por uma fenda simples, que pode ser visualizada em um anteparo colocado à frente da fenda:



Figura 16: Figura de difração produzida por uma fenda simples.



As concepções alternativas relacionadas ao efeito de difração são as seguintes:

a) *Fendas $a < \lambda$*

Os estudantes consideram que somente ocorre difração se a fenda utilizada tiver largura "a" menor que o comprimento de onda " λ " da luz incidente.

b) *Difração nas bordas*

O fenômeno da difração é interpretado apenas como um efeito de borda. A luz contorna os objetos, mas não há referência ao efeito, quando a luz atravessa uma pequena abertura.

c) *A luz não atravessa a fenda se $a < \lambda$*

Os estudantes consideram que a luz não atravessa a fenda no caso de sua largura ser menor que o comprimento de onda " λ ". Alguns estudantes acreditam que a luz pode não "encaixar" na fenda. Certamente, ao reduzirmos cada vez mais o tamanho de um orifício, em algum momento ele será tão pequeno que a luz não irá mais atravessá-lo. Entretanto, para esses alunos, basta que a abertura apenas seja menor que o comprimento de onda da luz incidente.

d) *Difração ou não em fenda*

Uso da Óptica Física quando a luz atravessa uma fenda larga, independentemente da forma ou largura da fenda, ou o uso da Óptica Geométrica para fenda estreita. Dos vários “raios de luz” que chegam à fenda, somente alguns, ou até mesmo um raio, atravessa a abertura. Concepção rigorosamente baseada na aplicação de luz como um feixe de raios luminosos que se propagam em linha reta; a fenda atua como um “filtro” para esses raios.

e) *Mistura da Óptica Física com a Óptica Geométrica*

Tratam a luz que passou pelo centro da fenda com a Óptica Geométrica e a que passou pelas bordas com a Óptica Física, desconhecendo a relação entre as duas teorias. Há falta de clareza sobre os modelos ondulatório e de raio de luz, em relação ao limite para o tratamento da luz como feixes luminosos. Talvez, a dificuldade seja um problema similar ao da dualidade onda/partícula, nesse caso, onda/raio.



2.2.7) Interferência

Utilizando duas fontes coerentes de ondas monocromáticas é possível observar a interferência, fenômeno caracterizado pela combinação de duas ou mais ondas que se sobrepõem em uma região do espaço. O fundamento teórico para a interferência de ondas eletromagnéticas é essencialmente baseado no princípio da superposição linear dos campos eletromagnéticos. De acordo com esse princípio, o campo elétrico resultante em um determinado ponto do espaço vazio é dado pela soma vetorial de vários campos elétricos no mesmo local, produzidos por diferentes fontes, ou seja:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Conforme o experimento de Thomas Young, utilizando duas fontes coerentes produzidas a partir de uma fonte iluminando duas fendas (figura 17), é possível visualizar os padrões de interferência em um anteparo colocado à frente.

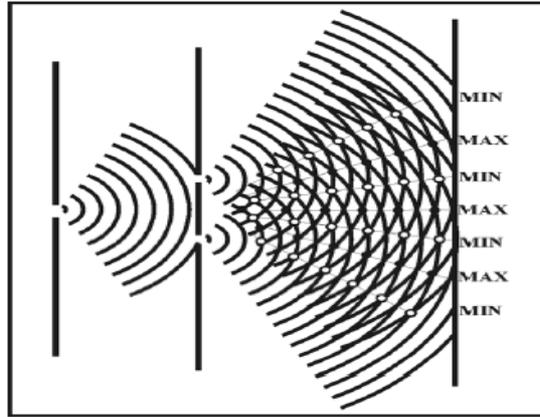


Figura 17: Máximos e mínimos de interferência no experimento de Young.

Thomas Young elaborou seu experimento a fim de produzir duas fontes de ondas coerentes, para que fosse possível a visualização das franjas de interferência. A coerência entre duas ondas significa que a diferença de fase entre elas é uma constante no tempo. Se a diferença de fase não for uma constante no tempo, varia aleatoriamente, nenhuma figura de interferência pode ser observada, pois a interferência muda de construtiva em um dado momento para destrutiva no momento seguinte, tornando o efeito imperceptível. Dizemos então que as duas ondas são *totalmente incoerentes*. Além disso, se as ondas que interferem forem polarizadas, a visualização da figura de interferência também dependerá da direção de polarização dos campos eletromagnéticos. Considerando, por exemplo, duas ondas planas polarizadas de mesma frequência ω . Os campos elétricos podem ser representados na forma complexa:

$$\vec{E}_{(1)} = \vec{E}_1 e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_1)}$$

$$\vec{E}_{(2)} = \vec{E}_2 e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_2)}$$

Onde φ_1 e φ_2 são introduzidos para representar qualquer diferença de fase entre as duas ondas.

Sendo que o valor real pode ser obtido fazendo

$$\vec{E}_{(i)}^R = \vec{E}_i + \vec{E}_i^* \quad \text{Onde } i = 1, 2.$$

Considerando que a intensidade é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico:

$$I \propto |\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^*$$

Desenvolvendo o cálculo, obtém-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} |\vec{E}|^2 &= \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \left[e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)} + e^{-i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)} \right] = \\ &= |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned}$$

O termo $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_1 - \varphi_2)$ é chamado *termo de interferência*, que é o responsável pela visualização das franjas de interferência. A diferença de fase é dada por $\varphi_1 - \varphi_2$, se as ondas forem totalmente incoerentes, essa quantidade varia aleatoriamente com o tempo e o valor médio do cosseno vai à zero. Se as ondas forem polarizadas com direções perpendiculares entre os campos elétricos, o produto escalar resulta nulo. Dessa forma, a visualização da figura de interferência também dependerá da polarização das ondas (FOWLES, 1989).

A figura 18-(a) representa uma onda plana que incide da esquerda para a direita sobre duas aberturas, atingindo o anteparo Σ no lado direito. A onda plana difrata pelas aberturas e deixa de ser plana ao atravessá-las, tornando-se, aproximadamente, esférica. Como são duas aberturas, podemos tratá-las como duas fontes de ondas, que podem interferir entre si:

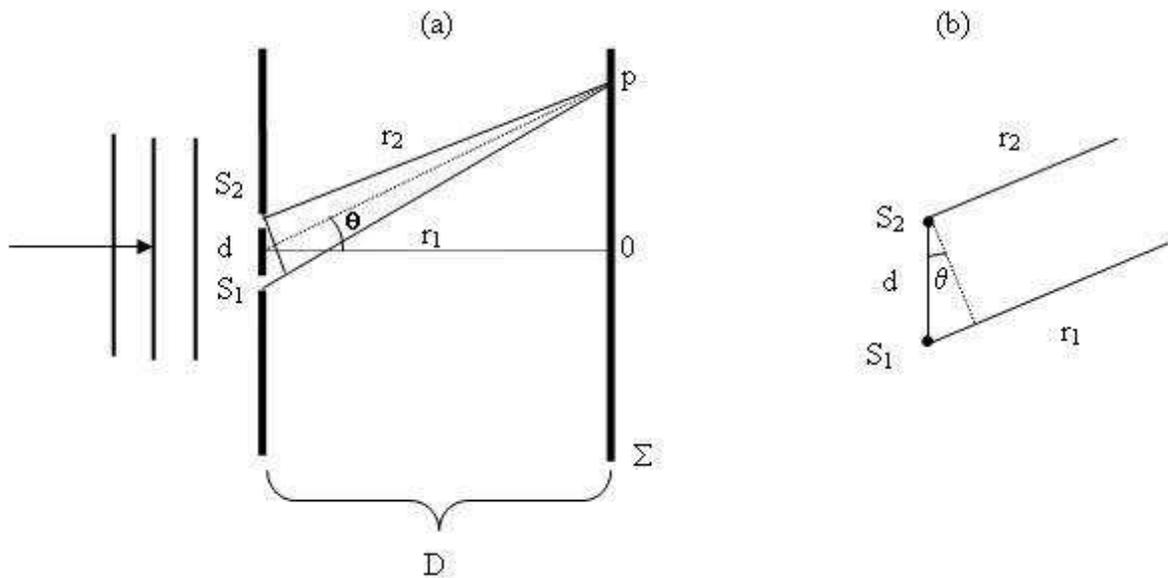


Figura 18: (a) Interferência a partir de uma onda plana difratada. (b) Aproximação para os raios r_1 e r_2 .

Considerando $D \gg d$, pode-se tratar os raios r_1 e r_2 como paralelos, conforme representado na figura 18-(b). Com isso, a diferença de percurso entre os dois raios é $d \sin \theta$.

Para a localização dos máximos de interferência, em uma posição p no anteparo Σ , basta igualar essa diferença a um número inteiro de comprimentos de onda:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

Pois a diferença de um número inteiro de comprimento de onda deixa as ondas em fase, e a interferência é construtiva.

No caso dos mínimos, igualamos a diferença de caminho óptico a um número ímpar de meio comprimento de onda:

$$d \sin \theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Dessa forma, as duas ondas estão defasadas de π , havendo interferência destrutiva.

Essas duas equações fornecem as posições dos máximos e mínimos de interferência tanto acima como abaixo do máximo central em “0”, representado na figura 18-(a).



Figura 19: Figura de interferência produzida por duas fendas.

Diferentemente da figura que surge no caso de uma única fenda, as ondas provenientes das duas fendas interferem entre si, o que provoca a modificação no padrão de interferência observado em um anteparo.

A imagem que surge na figura 19 é devido ao efeito de interferência das ondas luminosas e, nos dois casos, ocorre a difração da luz pelas fendas.



As principais concepções alternativas identificadas sobre o efeito de interferência são as seguintes:

- a) *Uma fenda produz os mesmos padrões de interferência de duas fendas*

Não há atribuição de diferença entre a figura de difração produzida por uma fenda e a figura de interferência produzida por duas fendas, ou seja, os estudantes acreditam que cada fenda sozinha é capaz de produzir o mesmo padrão de interferência que um par de fendas.

- b) *Divisão do padrão de interferência*

Metade do padrão de interferência é produzida por uma fenda e a outra metade pela outra, excluindo a possibilidade de outras fendas.



2.2.8) Polarização

Por volta do ano de 1938, o físico americano Edwin Land conseguiu reproduzir o efeito da polarização com a *luz visível*. Land foi o criador do filtro polarizador para luz, o

"Polaróide", barato e eficiente, e inventou uma câmera fotográfica de revelação instantânea que teve enorme sucesso, garantindo uma fortuna com suas pesquisas.

Sendo a luz uma onda eletromagnética e, no espaço vazio, tem os seus campos elétrico e magnético vibrando perpendicularmente à direção de propagação, se a vibração do campo elétrico, ocorrer em um plano do espaço, tem-se uma onda linearmente polarizada (plano-polarizada). Da mesma forma, o campo magnético também estará vibrando em um plano.

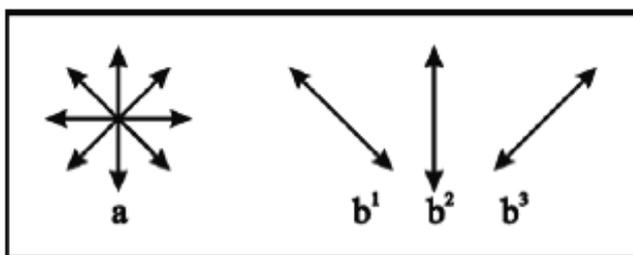


Figura 20: Representação das disposições do campo elétrico em uma onda não polarizada (a) e de ondas plano-polarizadas (b).

Existem diversas formas de tornar uma onda eletromagnética polarizada: por absorção, espalhamento, reflexão e birrefringência. Provavelmente, a mais conhecida é a polarização por absorção, na qual uma onda plano-polarizada é obtida a partir de um filtro polarizador, cujo material é construído especialmente para transmitir apenas uma direção de vibração do campo elétrico, paralelo ao seu *eixo de transmissão*.

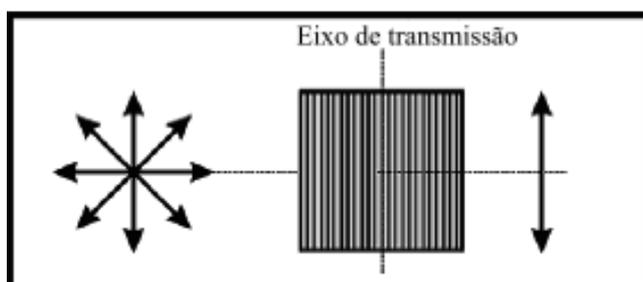


Figura 21: Polarização por absorção por um filtro polarizador.

A polarização plano polarizada, (polarização linear) consiste em fazer o campo elétrico oscilar em uma única direção e, conseqüentemente, o campo magnético também. Como o campo elétrico, no vácuo, é perpendicular à direção de propagação, este define um plano no espaço, chamado *plano de vibração*, enquanto a onda se propaga. Assim, temos dois planos perpendiculares entre si: um contendo o campo elétrico e outro o magnético.

Na figura 22 estão representados os campos elétrico e magnético de uma onda plana monocromática, que se propaga na direção do eixo X. O plano que contém o campo elétrico coincide com o da página:

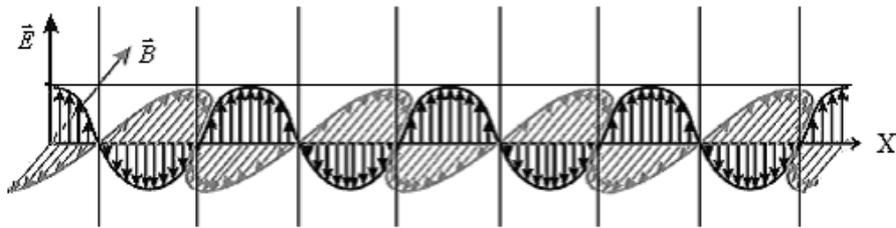


Figura 22: Onda eletromagnética plano-polarizada.

Além desse tipo de polarização, existem também a polarização circular e a elíptica. Nos casos de fontes de luz, como o Sol ou uma lâmpada de incandescência, por exemplo, a luz emitida em uma dada direção consiste em muitas ondas independentes, com seus campos elétricos orientados em planos de vibração aleatórios, em torno da direção de propagação. Nesse caso, a luz é dita não-polarizada.

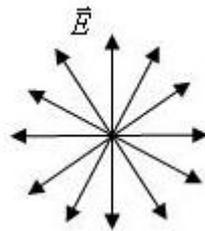


Figura 23: Representação de luz não-polarizada.

Teoricamente, é possível decompor cada campo elétrico da figura acima em componentes y e z e determinar o campo resultante na direção y e na direção z. Com isso, podemos transformar matematicamente a luz não-polarizada em duas ondas planas superpostas:

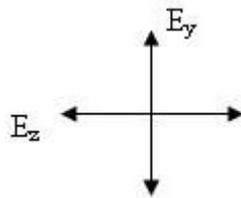


Figura 24: Decomposição do campo elétrico.

Com isso, pode-se escrever a equação que represente o campo elétrico oscilante:

$$\vec{E} = (E_y \hat{j} + E_z \hat{k}) \text{sen}(kx - \omega t) \quad \text{Supondo "E}_y\text{" e "E}_z\text{" reais.}$$

Se as componentes do campo elétrico não estiverem oscilando em fase, o vetor do campo elétrico gira em torno do eixo de propagação, descrevendo uma onda elípticamente polarizada: $\vec{E} = E_y \hat{j} \text{sen}(kx - \omega t) + E_z \hat{k} \cos(kx - \omega t)$, por exemplo.

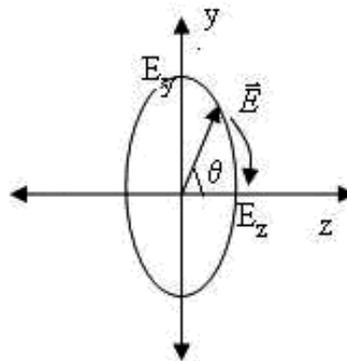


Figura 25: Polarização elíptica.

Para o caso particular $E_y = E_z$, a onda é *circularmente polarizada*.

As principais concepções alternativas em relação ao efeito de polarização da luz são as seguintes:

a) *A luz polarizada está concentrada em uma só direção*

Acreditam que o fenômeno da polarização se relaciona com alguma limitação na direção de propagação. Dessa forma, associam a polarização da luz a uma única direção de propagação, ao invés de relacionar com a direção de vibração dos campos elétrico e magnético.

b) *Polarização como absorção*

Consideram que a polarização ocorre quando são absorvidos determinados comprimentos de onda, resultando a monocromaticidade total ou parcial, desconsiderando a possibilidade de haver luz branca polarizada.

c) *Polarizador como rede*

Consideram que a luz polarizada é uma “luz filtrada”, que deve passar por uma superfície muito pequena, mas não única, como uma espécie de rede.

d) *Polarizador como refletor*

Segundo essa concepção, o óculos polarizador evita a reflexão da luz solar *nos olhos*, ou seja, tem a função de refletir a luz, impedindo que esta chegue ao olho do observador, protegendo-o.



2.2.9) Espelhos

Espelho plano

O espelho plano pode ser considerado como um caso particular dos espelhos esféricos, considerando um raio de curvatura infinito. Pode ser definido como uma superfície plana e lisa (homogênea) que reflete specularmente a luz. Os raios partem do objeto “O” (figura 26) e são refletidos no espelho chegando até o observador. Os raios

refletidos parecem divergir de um ponto “i” atrás do espelho. O observador enxerga a imagem do objeto nesse ponto. Entretanto, os raios de luz não partem realmente dessa posição, por essa razão denomina-se a imagem de virtual (HEWITT, 2002). Chamamos de *imagem real* aquela formada na posição onde os raios luminosos realmente se cruzam.

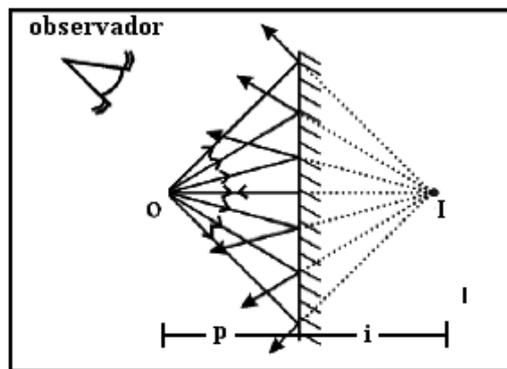


Figura 26: Formação de imagem por espelho plano.

A imagem formada por um espelho plano é sempre virtual, porém, não sofre qualquer alteração no seu tamanho, ou seja, um espelho plano não é capaz de provocar efeito de ampliação. A imagem formada tem o tamanho do seu objeto, independente da distância que esteja do espelho. Com isso, a relação entre a distância da imagem ao espelho e do objeto ao espelho é $i = -p$. Onde, por convenção, a distância “i” da imagem ao espelho é negativa. Para um objeto extenso, a imagem é obtida determinando-se a imagem de cada ponto do objeto. Entretanto, podemos determinar a imagem a partir de três raios:

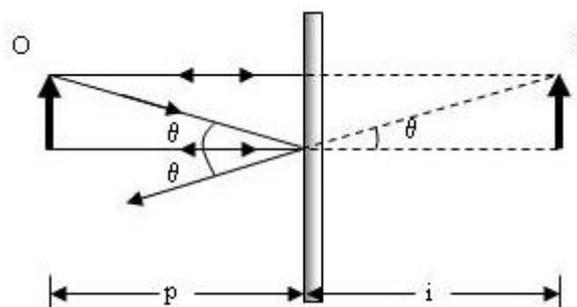


Figura 27: Imagem de objeto extenso em espelho plano.

As principais concepções alternativas sobre a formação de imagens por espelhos planos são:

a) *A imagem está na superfície do espelho*

Essa concepção, provavelmente, tem origem na dificuldade em conceber as características das imagens virtuais, que são formadas pelos prolongamentos dos raios refletidos na superfície do espelho, o que já sugere que a imagem não pode estar na superfície do espelho, mas atrás dele. A imagem formada por um espelho plano não é somente do objeto em questão, mas de parte do ambiente que cerca esse objeto, sendo, portanto, reproduzida a distância que o objeto está do espelho.

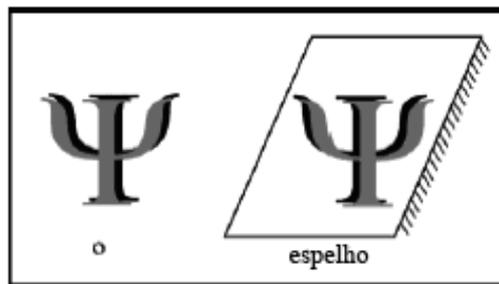


Figura 28: Imagem está na superfície do espelho.

b) *O tamanho da imagem depende da distância do objeto ao espelho*

Quando um objeto se afasta de um espelho plano, sua imagem diminui:

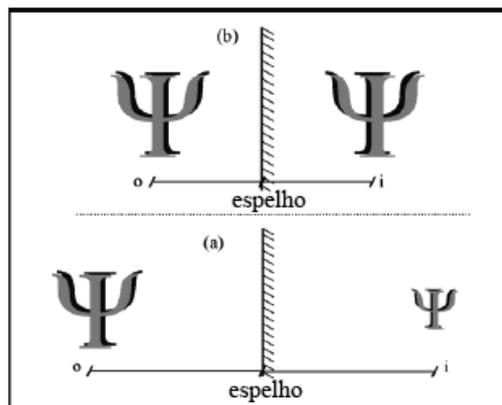


Figura 29: Redução da imagem com o aumento da distância.

Possivelmente, tal concepção esteja relacionada à dificuldade de traçar os “raios básicos” para determinação de imagens em espelhos planos.

c) *A posição da imagem depende do observador*

Quando um observador se move para um lado a imagem de um objeto observado se moverá para o lado contrário. Na verdade, a posição da imagem depende somente da posição relativa do objeto ao espelho. A visualização dessa imagem é que depende da posição na qual o observador está, ou seja, estar posicionado em um local onde os raios refletidos no espelho, provenientes do objeto, possam chegar aos olhos do observador.

d) *Espelhos só podem ser feitos de metal ou vidro*

Não consideram os espelhos planos simplesmente como qualquer superfície polida que reflete regularmente a luz, devendo ser, somente, de metal ou vidro.

e) *Espelhos como refletores perfeitos*

Acreditam que os espelhos devem refletir toda luz incidente. Considerando apenas casos ideais, nos quais não há possibilidade de ocorrer absorção parcial da luz.



Espelho esférico

Pode-se definir um espelho esférico como uma superfície curva que reflete specularmente a luz. Se ocorrer a reflexão da luz em sua parte interna, tem-se um espelho côncavo, caso ocorra na parte externa, o espelho é convexo. Os elementos de um espelho esférico são: o ponto “v” denominado *vértice do espelho*; o ponto “c” é o centro de curvatura denominado *centro do espelho*; o raio “r”, é o *raio de curvatura*, que corresponde à distância entre o ponto “c” e o espelho; o *ponto focal* “F”. A distância entre o ponto focal e o centro do espelho é chamada de *distância focal*. A equação dos espelhos esféricos tem a forma:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

Onde “f” é a distância focal, “p” é a distância entre o objeto e o espelho e “i” é a distância entre a imagem e o espelho.

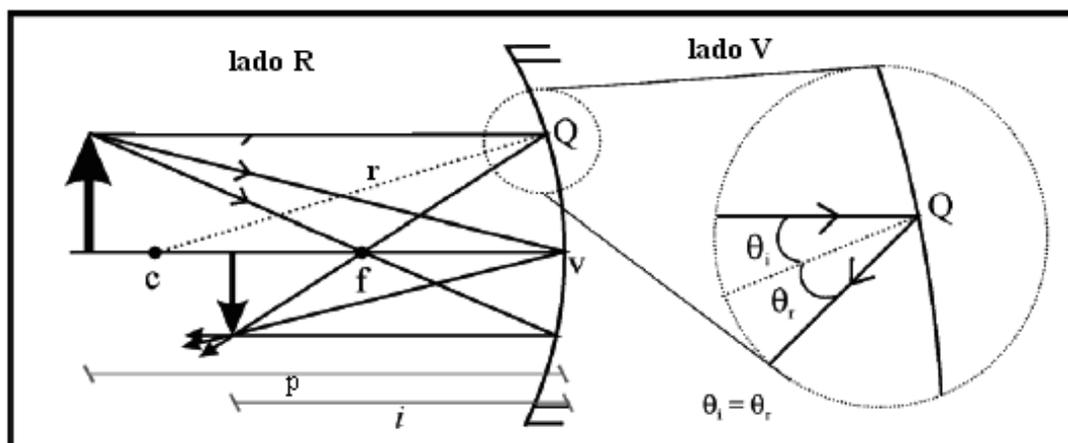


Figura 30: Representação da validade das leis da reflexão no espelho esférico.

Por definição, o lado “R” do espelho é aquele no qual os raios são refletidos e podem formar *imagens reais*. O lado “V”, é o lado do espelho onde podemos ter os prolongamentos dos raios refletidos, formando as *imagens virtuais*. Além disso, para diferenciar entre os focos dos espelhos côncavo e convexo, chamamos de *foco real* (foco efetivo), no lado “R” do espelho, e *foco virtual* (foco aparente), no lado “V” do espelho, respectivamente. A distância focal “f” está relacionada ao raio de curvatura, para ambos os espelhos, da seguinte forma:

$$f = \frac{r}{2}$$

Com isso, a equação dos espelhos esféricos pode ser escrita como

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

A partir dos raios de luz, obtém-se um método útil para a localização de imagens com uma construção geométrica denominada *diagrama de raios*. São considerados quatro raios principais para os espelhos esféricos:

Para o espelho côncavo:

i) O raio que incide paralelamente ao eixo central (raio azul-1, figura 31) é refletido passando pelo foco do espelho côncavo;

ii) O raio que incide obliquamente no vértice de um espelho côncavo (raio verde-2, figura 31), é refletido fazendo com o eixo um ângulo igual ao de incidência.

iii) O raio que passa pelo foco de um espelho côncavo (raio amarelo-3, figura 31) é refletido paralelamente ao eixo.

iv) O raio que passa pelo centro de curvatura (raio vermelho-4, figura 31), atinge perpendicularmente a superfície do espelho e é refletido na direção de incidência.

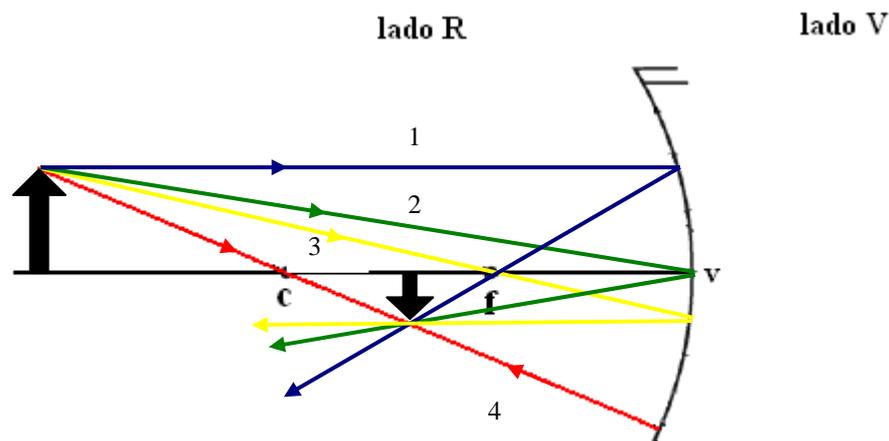


Figura 31: diagrama de raios principais para o espelho côncavo.

Para o espelho convexo:

i) o raio refletido, de uma incidência paralela ao eixo central de um espelho convexo, tem seu prolongamento passando pelo ponto focal (raio azul-1, figura 32).

ii) Para o espelho convexo, o raio também é refletido na direção de incidência, caso o seu prolongamento passe pelo centro de curvatura (raio verde-2, figura 32).

iii) o raio que incide em um espelho convexo de forma que a sua direção passe pelo foco virtual (raio amarelo-3, figura 32), tem o prolongamento do raio refletido paralelo ao eixo.

iv) O raio que incide obliquamente no vértice do espelho convexo, reflete com ângulo, em relação ao eixo central, igual ao de incidência (raio vermelho-4, figura 32).

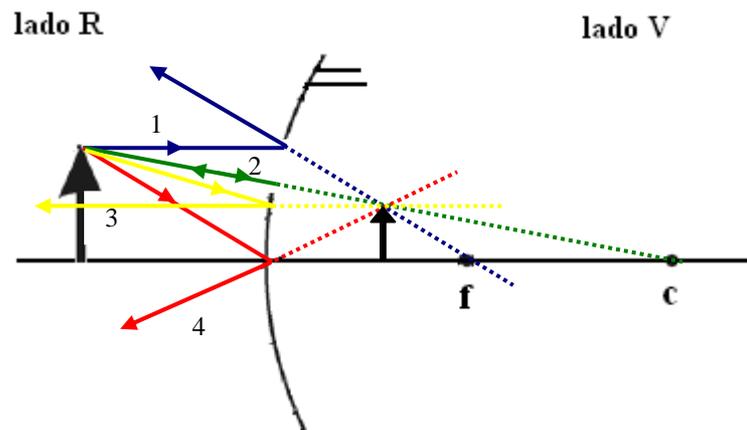


Figura 32: diagrama de raios principais para o espelho convexo.

De acordo com a convenção para os lados R e V do espelho, as imagens formadas por espelhos convexos são sempre virtuais, pois para qualquer posição que o objeto seja colocado, os raios incidentes no espelho serão refletidos, divergindo no lado R, e a imagem é localizada pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios refletidos. Além disso, a imagem é sempre direita e reduzida. O mesmo não ocorre para espelhos côncavos, pois conforme a posição do objeto, podem formar imagens reais ou virtuais. Para um objeto posicionado entre o centro de curvatura e o ponto focal, por exemplo, a sua imagem é real, invertida e ampliada:

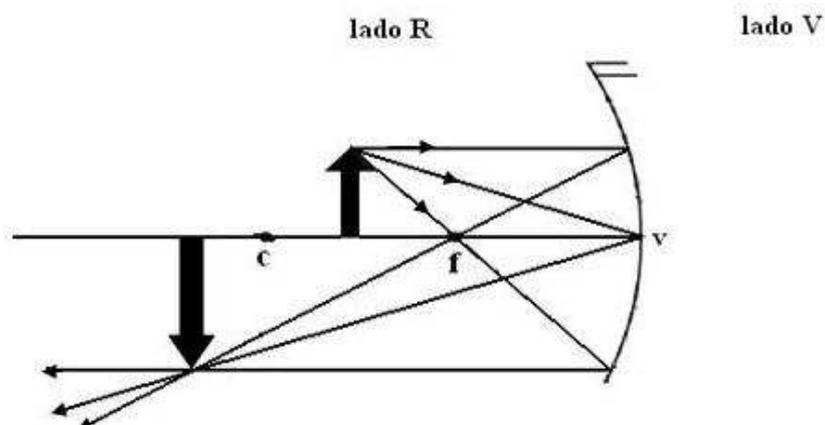


Figura 33: Formação de imagem por espelho côncavo.

Se o objeto for colocado entre o ponto focal e o vértice do espelho, a imagem formada será virtual, direita e ampliada.



Concepções alternativas identificadas envolvendo espelhos esféricos:

a) *Validade da 2ª lei da reflexão*

Os estudantes não consideram que a 2ª lei da reflexão seja aplicável para espelhos esféricos, acreditam que não é possível traçar uma normal para uma superfície esférica no ponto de incidência. Para alguns estudantes, a 2ª lei somente é válida para o centro de curvatura.

b) *A imagem não pode existir no espaço*

Independente da superfície do espelho, não é possível que a imagem de um objeto se forme no espaço, é necessário um anteparo no qual a imagem possa ser visualizada.

c) *Observação completa da imagem real*

A imagem real formada por um espelho côncavo sempre pode ser totalmente observada, independente dos limites inevitáveis do sistema óptico, como, por exemplo, o tamanho do espelho, desconsiderando a existência de um campo de visão.



2.2.10) Lentes

Uma lente pode ser definida como uma superfície refratora estreita limitada por duas superfícies transparentes. Quando essas superfícies são esféricas (ou apenas uma delas), a lente é denominada esférica. Existem seis tipos de lentes delgadas compatíveis com essa definição:

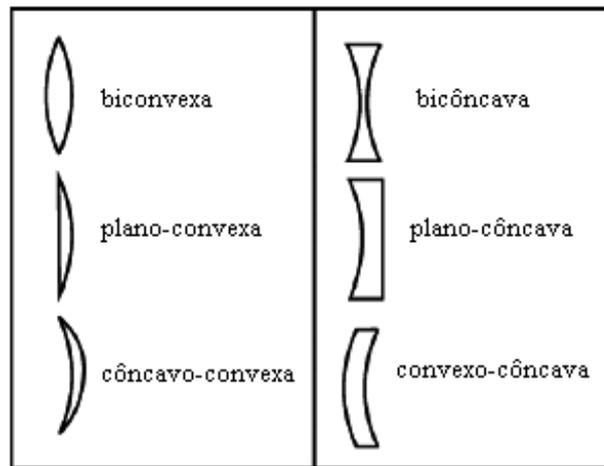


Figura 34: Principais tipos de lentes.

As lentes convergentes possuem espessuras maiores em seus centros do que em suas bordas, com a condição de que essa lente tenha índice de refração maior que o meio no qual esteja imersa. Uma lente divergente é qualquer lente que seja mais delgada no seu centro do que em suas bordas, com a mesma exigência para o índice de refração. Porém, a convergência e a divergência de uma lente dependem do meio circundante, pois esses comportamentos são dependentes dos índices de refração do meio e da lente. Para cada lente existem dois focos, podendo a luz incidir em qualquer uma das faces. O ponto “C” é o centro de curvatura da lente localizado a uma distância “r” do seu centro óptico. A distância focal “f” é a distância entre o foco e o centro óptico. Por convenção, o lado *negativo* é a face em que há incidência da luz e o lado *positivo* é a face em que há transmissão da luz.

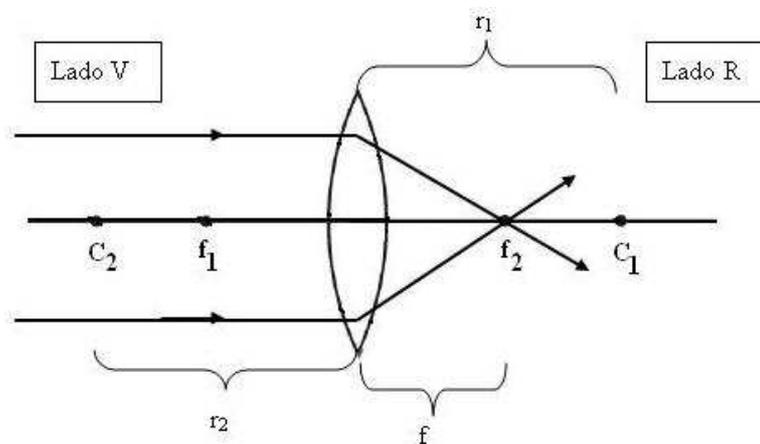


Figura 35: Lente convergente.

Dessa forma, os sinais convencionados para as lentes são:

i (distância imagem-lente):

Imagem real (+), se a imagem está atrás da superfície (lado da transmissão)

Imagem virtual (-), se a imagem está na frente da superfície (lado da incidência)

r, f (raio de curvatura e distância focal):

Se o centro de curvatura está no lado da transmissão (+)

Se o centro de curvatura está no lado da incidência (-)

De acordo com essa convenção, o centro de curvatura C_2 da segunda superfície (esquerda para direita) está a uma distância “- r_2 ” do centro da lente, e o centro de curvatura da primeira superfície a uma distância “+ r_1 ”. Essa convenção de sinais também permite identificar os tipos de imagem, real e virtual, já comentados anteriormente. Sendo assim, atribui-se o sinal negativo à imagem virtual e o positivo à imagem real.

A equação das lentes delgadas tem a seguinte forma:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

Onde “f” é a distância focal da lente e é dada por:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Sendo “n” o índice de refração do material da lente, com r_1 , o raio de curvatura da primeira superfície da lente e r_2 o da segunda.

Como no caso dos espelhos planos e esféricos, para a formação de imagens pelas lentes, é necessário, pelo menos, que de cada ponto do objeto que se deseja localizar a imagem emergjam dois raios na direção da lente.

Diagrama de raios principais para lentes

Para o caso das lentes delgadas, são três raios principais para localizar a imagem formada:

- o raio que incide paralelamente ao eixo principal é refratado, passando pelo segundo foco da lente convergente (raio 1, figura. 36). Na lente divergente, o raio que incide paralelamente ao eixo principal diverge como se viesse do primeiro ponto focal da lente (raio 1, figura. 37).
- o raio que passa pelo primeiro foco emerge paralelamente ao eixo principal em uma lente convergente (raio 3, figura. 36). O raio que incide em uma lente divergente, de forma que seu prolongamento passe pelo segundo ponto focal, emerge paralelamente ao eixo principal da lente (raio 3, fig. 37).
- o raio que incide no centro óptico não sofre desvio, tanto para lentes convergentes como para as divergentes (raio 2).

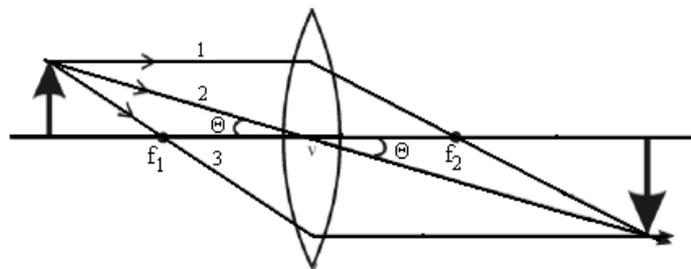


Figura 36: Raios em uma lente convergente.

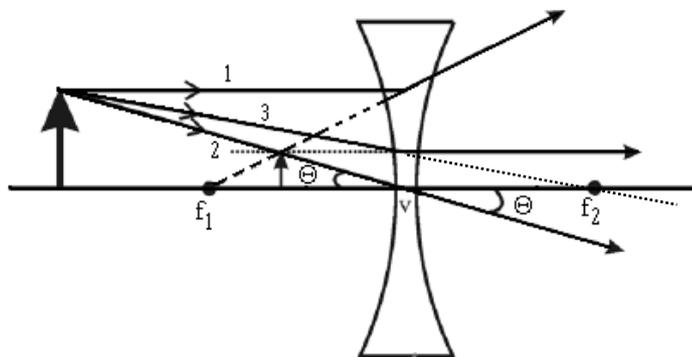


Figura 37: Raios em uma lente divergente.

As concepções alternativas relacionadas ao conceito de lentes são:

a) *Lente como "acelerador"*

A lente aumenta a velocidade da luz que a atravessa, desconhecendo o próprio fenômeno da refração no qual um feixe que incide sobre um meio de índice de refração “n” maior, tem a sua velocidade aparentemente diminuída para “c/n”.

b) *Formação de imagem com dois pontos distintos ou sem lente*

Acreditam que para formar a imagem é preciso apenas um raio que saia de dois pontos do objeto (base e topo), desconsiderando que são necessários, no mínimo, dois raios de cada ponto do objeto. A imagem de um objeto pode se formar em um anteparo sem a existência de lente. Não havendo, portanto, relação alguma sobre a função do olho em como enxergamos.

c) *A lente deve estar completa*

Quando parte da lente é coberta será transmitida apenas uma parte da imagem.

Essas são as principais concepções alternativas sobre os conceitos da Óptica, identificadas por pesquisas na área de Ensino de Ciências, que podem ser encontradas, não só em estudantes no início da educação científica, mas, inclusive, de alunos de graduação e professores do ensino de nível médio.



2.3 – Mapas conceituais e sua utilização no ensino de ciências

De forma sucinta, mapas conceituais são diagramas que têm como objetivo reunir os conceitos fundamentais de alguma área de interesse. As relações entre os conceitos são indicadas através de conectores nomeados, relacionando-os de forma hierárquica e significativa, explicitando a estrutura conceitual de alguma área de conhecimento. São diferenciados dos demais diagramas, como, por exemplo, os fluxogramas, ou diagramas de blocos, pois têm como característica principal, apenas apresentar conceitos e suas relações,

sem indicar direções preferenciais como no caso dos fluxogramas. É possível traçar um mapa conceitual para toda uma disciplina, parte dela ou para um determinado tópico, representando as relações hierárquicas dos seus conceitos. Além disso, um mapa conceitual elaborado para um determinado conteúdo não é único, ou seja, é apenas uma das possíveis representações da estrutura conceitual em estudo. Os mapas conceituais foram sugeridos por Joseph D. Novak, com o intuito de por em prática a Teoria da Aprendizagem Significativa de David P. Ausubel, tornando possível uma representação da estrutura cognitiva de um indivíduo. De acordo com Novak (2006), mapas conceituais são ferramentas para a organização e representação do conhecimento, que contém conceitos usualmente colocados dentro de círculos conectados por linhas nomeadas (conectores), que representam as relações entre esses conceitos. Podem assumir diversas formas que podem ser, em princípio, identificadas por dimensões, podendo ter uma, duas ou mais dimensões. Mapas unidimensionais são apenas listas verticais de conceitos que apenas representam a hierarquia ou o grau de importância conceitual de maneira simples e pouco representativa. Mapas bidimensionais oferecem a possibilidade de se expressar as relações conceituais de uma área de conhecimento de forma mais completa, por exemplo, de uma disciplina, possibilitando a estruturação simétrica do mapa nas diversas direções do plano. Este tipo de mapa conceitual é o mais utilizado, por ser mais um diagrama mais familiar e completo, além das limitações dos mapas unidimensionais e a abstração dos mapas com mais de três dimensões (MOREIRA, 1992).

Durante o mapeamento conceitual de uma disciplina ou subdisciplina, interessa-nos destacar os conceitos que a identificam e que são sua base conceitual, os seus conceitos-chave, em continuidade, podem ser apresentados os seus conceitos subjacentes, suas relações e assim por diante, de acordo com os processos de *diferenciação progressiva* e *reconciliação integrativa*, descritos pela teoria ausubeliana. Dessa forma, um construtor de

mapas pode representar a forma com a qual os conceitos científicos, de uma determinada área de estudo, estão relacionados na sua estrutura cognitiva, na maneira que ocorre sua compreensão, em uma determinada época. Disso decorre que um mapa conceitual construído para uma determinada área de interesse pode sofrer alguma modificação, tornar-se mais complexo, apresentando mais relações significativas entre conceitos de forma progressiva e diferenciada, à medida que o indivíduo amplia seu conhecimento do conteúdo em questão. Entretanto, mapas conceituais não são auto-explicativos, ou seja, não dispensam explicações de quem o construiu. Assim sendo, mapas conceituais devem ser apresentados ou, no mínimo, acompanhados de um texto explicativo. Dessa maneira, é possível compreender as relações entre os conceitos existentes no mapa e como está representada a sua hierarquização conceitual, quando utilizado, por exemplo, como instrumento didático. Na verdade, não existem regras que definam os mapas conceituais em termos de “certo ou errado”, ou seja, um mapa de conceitos deve sempre ser visto com “um mapa conceitual” e não como “o mapa conceitual”. A partir dessa diversidade de opções, é de se esperar que o formato dos mapas conceituais seja uma variável, além da dependência idiossincrática de quem constrói, pois existem várias possibilidades criteriosas para expor os conceitos e suas relações em um mapa conceitual. Como exemplo, pode-se citar o fato de que vários especialistas de uma mesma área de conhecimento, ao traçarem um mapa conceitual, possivelmente, *“refletirão pequenas diferenças de compreensão e interpretação das relações entre conceitos chave dessa área”* (MOREIRA, p. 2, 1992).

2.3.1) Utilização e elaboração de mapas conceituais

De um modo geral, mapas conceituais podem ser usados tanto como instrumentos de ensino como de aprendizagem, mas devem ser introduzidos quando os alunos já possuem algum conhecimento sobre o conteúdo a ser ensinado. Ademais, também podem

ser utilizados para o planejamento e organização curricular, assim como instrumento de avaliação. Neste caso, não com o objetivo de classificar o aluno, atribuindo-lhe um escore, mas de permitir ao professor identificar como as informações estão relacionadas na estrutura cognitiva do estudante. Contudo, em cada uma dessas aplicações, mapas conceituais sempre podem ser interpretados como instrumentos para a negociação de significados (MOREIRA, 1992).

Um mapa conceitual pode ser traçado manualmente; com o uso de softwares apropriados ou adaptados, ou seja, qualquer software que tenha suporte para textos e figuras. Como exemplo de softwares próprios para a construção de mapas conceituais, podem ser citados o *CmapTools – knowledge modeling kit*, que foi desenvolvido pelo Institute for Human and Machine Cognition (IHMC), uma unidade de pesquisa da University of West Florida estabelecida em 1990, disponível na página da internet <http://cmap.ihmc.us/>, e o Inspiration, cuja versão demonstrativa está disponível na página da internet <http://www.inspiration.com/home.cfm>. São apresentados abaixo, algumas características dos mapas de conceitos:

- Como o próprio nome sugere, é constituído por conceitos, deve-se evitar colocar nomes de autores, cidades, expressões matemáticas, etc.
- Os conectores que estabelecem as relações entre os conceitos, devem ser nomeados, de forma que a palavra ou frase (curta) possa representar a relação entre os conceitos relacionados. Estas linhas, em princípio, não devem ter o formato de setas, o que transformaria o mapa em um fluxograma;
- Não é auto-explicativo, ou seja, um mapa conceitual deve ser acompanhado de uma explicação. O construtor do mapa deve apresentá-lo ou oferecer um texto explicativo do mesmo, explicitando e/ou justificando as relações e, quando for o caso, as não-relações. Ademais, a hierarquia conceitual pode

assumir diversas formas de representação, sendo necessário que o autor do mapa também comente sobre o seu critério de classificações para representar os principais conceitos do mapa.

Durante a elaboração de um mapa conceitual, conforme já comentado, o desejável é identificar os conceitos-chave do conteúdo em questão, resultando, na maioria dos casos, em poucas palavras. Porém, à medida que o mapa aumenta sua complexidade, pode-se acrescentar conceitos subjacentes, mais específicos, com menor grau de generalidade. Um modelo simples de mapa conceitual, consiste em colocar os conceitos mais importantes, por exemplo, de uma teoria científica, no topo do mapa. Logo abaixo, podem ser colocados os conceitos subordinados e na base do mapa, os conceitos mais específicos, inclusive, alguns exemplos. Mapas desse tipo, possuem hierarquia conceitual vertical. Os conceitos são diferenciados progressivamente, do topo até a base do mapa. As figuras seguintes representam, apenas como ilustração, dois modelos de mapas conceituais:

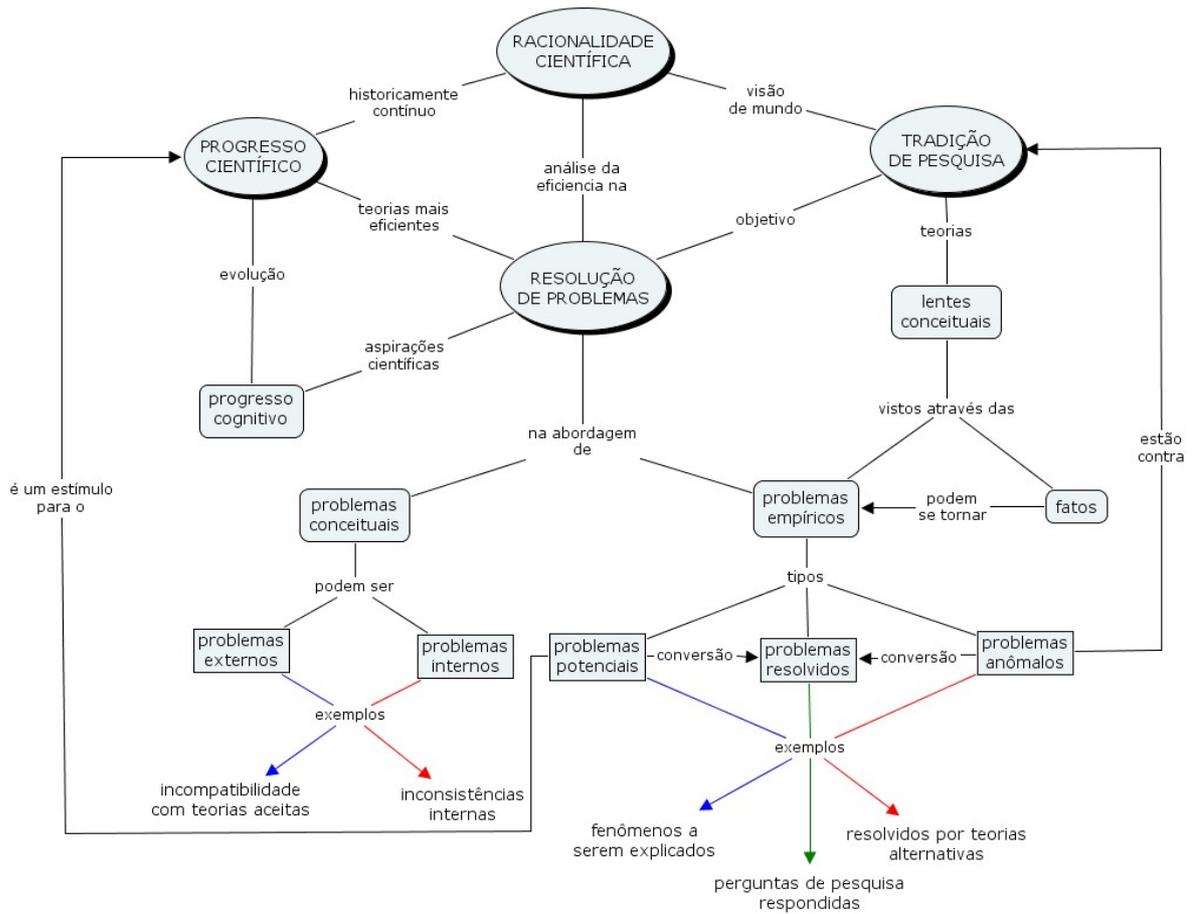


Figura 38: Um mapa conceitual para a epistemologia de Laudan.

Um mapa conceitual para a teoria de aprendizagem de Vigotsky (Voltaire de O. Almeida)

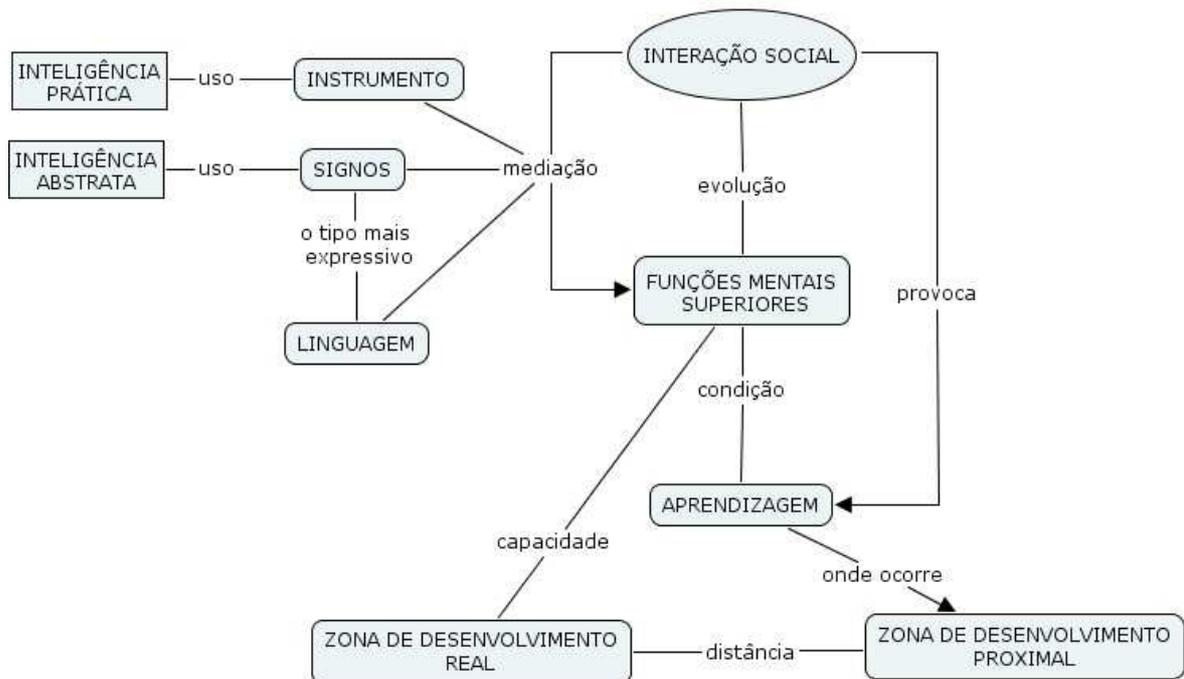


Figura 39: Um mapa conceitual para a teoria de Vigotsky.

O primeiro mapa conceitual (figura 38), no qual são apresentados, não apenas os conceitos fundamentais da epistemologia de Larry Laudan, mas outros conceitos subjacentes, que também surgem na sua abordagem, apresenta os conceitos fundamentais colocados no seu topo dentro de elipses e os subordinados logo abaixo dentro de retângulos. Pode-se dizer que sua hierarquia conceitual é vertical, pois os conceitos são diferenciados em grau de importância de cima para baixo. No caso do segundo mapa (figura 38), sua forma é mais reduzida, mais enxuta, pois tende a apresentar somente os conceitos-chave da teoria de aprendizagem de Vigotsky. Para este mapa, a hierarquização conceitual não é puramente vertical, pois explora a colocação de conceitos subordinados no eixo horizontal do mapa. Se fossem acrescentados mais conceitos, seria possível colocá-los acima do conceito-chave “interação social”, o que levaria o mapa a ter uma hierarquização radial. Na verdade, não existem regras fixas para a apresentação dos conceitos em um mapa conceitual, o que, novamente, salienta a necessidade de ser explicado.

Embora os exemplos apresentados acima estejam relacionados a teorias de caráter científico, os mapas conceituais podem ser construídos para diversos conteúdos, de histórias infantis a teorias científicas. A versatilidade dos mapas conceituais, de acordo com o que já foi mencionado, permite que sejam utilizados tanto para facilitar a aprendizagem significativa, seja como organizadores prévios⁹ ou para trabalhar diretamente com o conteúdo a ser ensinado; para análise e organização de conteúdo, assim como instrumento norteador para o próprio professor.

A técnica dos mapas conceituais, por constituir uma ferramenta de aprendizado e ensino tão ampla e flexível, tornou-se foco de pesquisas na área do Ensino de Ciências, que objetivam investigar sua eficiência durante o ensino de conceitos científicos e organização

⁹ No capítulo seguinte, quando a fundamentação teórica for apresentada, o conceito de organizador prévio será comentado de forma mais ampla.

curricular. Como exemplo disso, pode-se citar da investigação proposta por Romero Tavares e Gil Luna (2003), na qual a adoção dos mapas conceituais, como ferramenta pedagógica para a consecução do currículo escolar, foi analisada, destacando algumas utilizações:

- I. Organizar o currículo em uma seqüência lógica de conceitos;
- II. Facilitar a modelagem e o aprimoramento dos conceitos na estrutura cognitiva;
- III. Difundir o conhecimento através de suas estruturas hierárquicas;
- IV. Permitir que o aprendiz externalize seus conhecimentos, construindo seu próprio mapa conceitual;
- V. Condicionar ao aprendiz a aprendizagem significativa.

A proposta de Menegolla (2005) para o uso dos mapas conceituais, aborda o ensino dos conceitos da matemática, com o objetivo de utilizá-los como ferramenta de organização, que auxilie o aluno no reforço de conceitos matemáticos já adquiridos. Sua proposta surgiu de um trabalho desenvolvido em uma disciplina do curso de Mestrado de Educação em Ciências e Matemática, oferecido pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), ministrada pela Professora Doutora Marlene Grillo. Além disso, também considerou o fato de que os alunos, em geral, não compreendem a importância do aprendizado da matemática, questionando sua utilidade ao longo do seu desenvolvimento intelectual. De acordo com essa proposta de trabalho, a utilização dos mapas conceituais nesse contexto, permite, tanto ao aluno como ao professor, observar a evolução do entendimento sobre os conceitos envolvidos no estudo da matemática, abordados em sala de aula.

David Bianchini, da universidade PUCCAMP, e Joni de Almeida Amorim, da UNICAMP (2005), utilizaram mapas conceituais em sala de aula, com alunos de

Engenharia Elétrica da PUC-Campinas, no aprendizado de conceitos referentes ao conteúdo sobre telecomunicações, objetivando oferecer aos alunos a compreensão acerca das relações com outras áreas de conhecimento, como a Matemática e a Física. Constataram que a utilização dos mapas conceituais pode servir, adequadamente, para indicar as fases nas quais o aprendizado se encontra. Ademais, permitiu que fossem identificados os alunos que conseguiam fazer ou não a relação satisfatória entre vários tópicos de disciplinas já estudadas e de outras que ainda seriam abordadas, mas que já haviam sido brevemente apresentadas pelo professor, tornando possível tal constatação. A investigação realizada por Sansão et al (2005), verificou o uso dos mapas conceituais na disciplina “Ciências Físico-Químicas”, abordando o tópico “corrente elétrica”. O estudo foi realizado com quarenta e um (41) alunos do nível médio de uma escola da cidade de Lisboa. A metodologia adotada para a investigação foi de estudo de caso, que incluiu gravações das discussões dos grupos de alunos, sobre os mapas conceituais que foram elaborados ao longo da pesquisa. O trabalho de campo foi realizado em períodos letivos dos anos de 1994 e 1995. Os alunos envolvidos traçaram mapas conceituais, individuais e em grupos, antes e após a instrução formal, o que permitiu a observação. Os resultados da investigação indicam que há melhoria da aprendizagem dos alunos em relação aos conceitos estudados e sugerem que a utilização dos mapas conceituais seja uma alternativa como técnica de estudo.

Silveira (2004), da faculdade de São Paulo (FIG – Faculdades Integradas de Guarulhos), explorou o uso dos mapas conceituais como recurso didático na formação de licenciados em Ciências Biológicas. O objetivo da pesquisa foi de realizar atividades que estimulassem a capacidade de desenvolver situações que favoreçam a aprendizagem significativa, quando forem professores. O trabalho envolveu 35 alunos do curso de Ciências Biológicas, do período noturno. Em uma das etapas da pesquisa, os alunos

trabalharam, em grupos, com mapas conceituais com base em um texto oferecido na disciplina. O estudo demonstrou que a utilização dos mapas conceituais estimula o aluno a relacionar sistematicamente seus conhecimentos prévios com a nova informação, promovendo, também, o compartilhamento de significados entre os grupos e o professor.

A técnica do mapeamento conceitual pode ser adotada, portanto, quando estamos interessados em abordar os conceitos de alguma área de conhecimento, como estratégia didática para o ensino, aprendizagem e sua avaliação. Pode também ser considerada como uma poderosa ferramenta para a organização de informações.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O pressuposto teórico que embasa esta dissertação é a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Escolhida por ser uma teoria desenvolvida para tratar do processo ensino-aprendizagem em situação formal de ensino, partindo da premissa de que existe na mente do sujeito uma estrutura cognitiva, na qual os conceitos estão hierarquicamente relacionados, sendo isso o fator principal que determina a aprendizagem, pois é nessa estrutura que uma nova informação poderá ancorar-se interativamente para promover a aprendizagem significativa. Além disso, o mapeamento conceitual, técnica didática adotada para a realização dessa pesquisa, foi criado como uma forma de aplicação da teoria de Ausubel, o que reforça ainda mais a validade de sua escolha. Nas próximas seções, serão abordados alguns conceitos e considerações dessa teoria mais detalhadamente.

3.1- A teoria de David Ausubel para aprendizagem

Ausubel apresentou sua teoria de aprendizagem, ressaltando o conceito de aprendizagem significativa, na década de 1960, época na qual a influência behaviorista na escola era predominante (MOREIRA, 1999). Não concordava que a relação entre o ensino e a aprendizagem poderia ser examinada através de estímulos e respostas, como pretendiam os behavioristas, mas que é durante a aprendizagem que o indivíduo progressivamente atribui significados à nova informação, sendo, portanto, necessária uma abordagem cognitivista. Como uma teoria construtivista, considera a aquisição de corpos

organizados de conhecimento como a atribuição de significados pelo indivíduo durante a sua construção intelectual. Entretanto, alguns anos mais tarde, Joseph D. Novak, colaborando com Ausubel, tornou-se divulgador da teoria, refinando-a e adicionando-lhe um caráter humanista. Novak desenvolveu a técnica do mapeamento conceitual como uma forma de aplicar a teoria ausubeliana (MOREIRA, 1999), sugerindo a possibilidade de explicitar a estrutura cognitiva de um indivíduo, à medida que apresenta as relações hierárquicas entre os conceitos. Em seu livro, *Psicologia Educacional*, redigido em parceria com Joseph D. Novak e Helen Hanesian (1980), Ausubel apresentou sua postura em relação aos princípios psicológicos na educação, destacando a importância do papel da Psicologia Educacional na formação de professores. De fato, sendo que a aprendizagem em sala de aula é um *campo especial* da Psicologia Educacional¹⁰ (AUSUBEL, 1980), também deve tomar parte na formação de professores.

De acordo com Ausubel, o fator mais importante a ser considerado durante processo ensino-aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe, ou seja, as informações, os conceitos, as proposições, o conhecimento que está na sua estrutura cognitiva, e é vinculada a ela que a nova informação recebe significado. Este conhecimento pré-existente na mente do indivíduo é o fator determinante da aprendizagem. A *aprendizagem significativa* é o conceito central de sua teoria, e ocorre quando a nova informação ancora-se de maneira substantiva (não-litera) e não-arbitrária a informações específicas existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, as quais foram aprendidas de forma significativa. Esse conhecimento pré-existente que servirá de ancoradouro à nova informação, Ausubel denomina de *subsunção*. Em contraposição à aprendizagem significativa, temos a *aprendizagem mecânica*, que ocorre quando a nova informação associa-se de maneira literal e arbitrária à estrutura cognitiva do aluno (AUSUBEL, 1980), ou seja, se o aprendiz

¹⁰ A amplitude da Psicologia Educacional, como ciência aplicada, não será discutida nesse trabalho. Apenas serve como referência para os argumentos de David Ausubel.

não atribui significado psicológico a um novo conceito, apenas o memoriza, usando, por exemplo, o método de decorar, a aprendizagem será mecânica. Entretanto, esse tipo de aprendizagem não acontece em um “*vácuo cognitivo*” (AUSUBEL, pg. 38, 1980), pois há uma relação a essa estrutura, porém, literal e arbitrária, que não é proveniente da aquisição (construção) de significados novos. Ausubel reconhece que uma teoria válida para a aprendizagem não pode nos mostrar como ensinar, mas deve oferecer os caminhos, os pontos de partida para abordar o ensino de conteúdos (AUSUBEL, 1980). Nesse sentido, o autor indica duas condições para que ocorra a aprendizagem significativa: a) que o material apresentado seja *potencialmente significativo* e b) que exista uma *pré-disposição* por parte do aluno para aprender. De acordo com a primeira condição, um material apresentado para ser aprendido é dito potencialmente significativo se for possível que seu conteúdo seja relacionável à estrutura cognitiva do aluno de forma não-arbitrária e não-literal, portanto, também depende do aprendiz, de possuir ou não os subsunçores adequados, que possam servir de ancoradouro para as novas informações apresentadas. Uma questão que surge de imediato, se refere a seguinte situação: como prosseguir em direção e sentido da aprendizagem significativa, quando da inexistência dos subsunçores adequados ? Essa questão será retomada mais adiante, no momento em que forem discutidas, com maiores detalhes, as condições para a aprendizagem significativa. A segunda condição, a *pré-disposição* para aprender, implica em não importar o quão potencialmente significativo seja o material apresentado, se o aluno não demonstrar interesse em aprender. Destaque-se que nos dois casos, a inteligibilidade do material apresentado não pode garantir, por si só, a aprendizagem significativa.

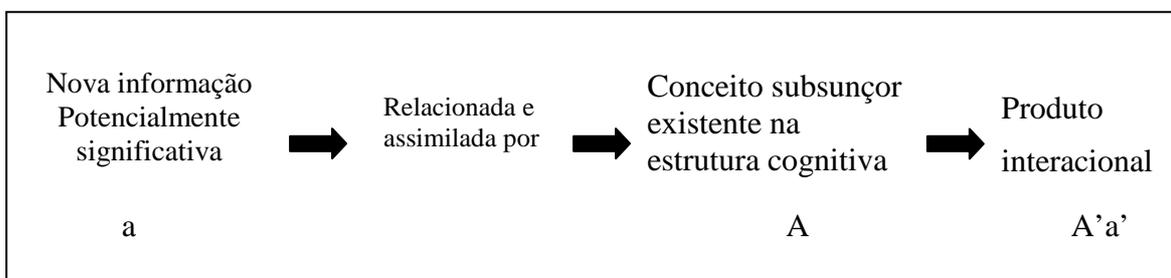
Considerando aquilo que o aluno já sabe, e tendo um material potencialmente significativo, Ausubel também defende de que o ensino de um conteúdo deve partir do mais geral para o mais inclusivo, definindo um processo que ele chama de *diferenciação*

progressiva. De acordo com isso, o ensino não deve iniciar com casos particulares, mas partir do mais amplo, apresentando as idéias mais gerais e inclusivas do conteúdo de uma disciplina, sendo *progressivamente diferenciadas* até chegar a um nível particular, específico, e, após, retornar ao geral, em um processo definido como *reconciliação integradora*. Na verdade, a diferenciação progressiva é um processo que sempre ocorre na aprendizagem significativa, pois os conceitos subsunçores, que servem de ancoragem para a nova informação, são modificados, elaborados, diferenciados progressivamente, adquirindo novos significados. Os conceitos pré-existentes, interagem com a nova informação e são modificados, passando a ser mais elaborados, complexos, o que torna a estrutura cognitiva mais rica, diferenciada e complexa. Para os alunos de Física, por exemplo, ao estudarem sobre o conceito de energia, evidentemente há a diferenciação progressiva do conceito, considerando as várias formas de energia: cinética, calorífica, eletromagnética, eólica, etc. O conceito de energia que o aluno possuía inicialmente, tornou-se mais amplo, diferenciado, modificado pela interação com as novas informações, nesse caso, outras formas de energia.

A reconciliação integradora (ou integrativa) se refere a uma reorganização dos conceitos subsunçores da estrutura cognitiva do indivíduo. Nesse caso, durante a aquisição de novas informações, estas são reconhecidas como relacionadas a outras já existentes na estrutura cognitiva do indivíduo, os subsunçores, havendo, então, uma reorganização dessas informações, que adquirem novos significados (MOREIRA, 1999). Portanto, a reconciliação integradora é um processo no qual são exploradas as relações entre idéias, buscando as suas diferenças e/ou semelhanças reorganizando-as na estrutura cognitiva. Por exemplo, para o aluno que já conhece o conceito de força em Física, dos estudos da mecânica newtoniana, ao estudar sobre força eletromagnética, poderá relacionar o seu conhecimento sobre força e a nova informação. Reconhecendo sua semelhança, pois ambas

se referem ao conceito força, e suas diferenças, uma tem um caráter mecânico, envolvendo o conceito de massa e campo gravitacional, enquanto que a outra tem um caráter eletromagnético, envolvendo o de carga e campo eletromagnético. Em sua estrutura cognitiva, há uma reorganização das informações, de acordo com o processo da reconciliação integradora, reconhecendo mais de um tipo força.

Para explicar a aquisição e organização de significados, durante esses processos, Ausubel apresenta o *princípio da assimilação*. De acordo com esse princípio, quando ocorre a aprendizagem significativa, ou seja, a nova informação interage de forma substantiva e não-arbitrária à estrutura cognitiva, o resultado dessa interação, é uma assimilação dos antigos significados com os novos, contribuindo para a diferenciação dessa estrutura (MOREIRA e OSTERMANN, 1999), ou seja, a nova informação, ao interagir com os subsunçores, os modifica, tornando-os mais amplos e complexos. O esquema a seguir representa o processo de assimilação:



Fonte: MOREIRA, M. A; OSTERMANN, F. Teorias construtivistas. Textos de apoio ao professor de Física, nº 10, p. 53. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 1999.

Naturalmente, o produto resultante $A'a'$ pode sofrer, ao longo do tempo, modificações, indicando que a assimilação não é um processo que encontra um ponto final, mas que permanece contínuo após a aprendizagem significativa, envolvendo novos processos de aprendizagem. Por exemplo, no ensino de Óptica, o aluno já possui um conceito sobre o tratamento da luz, comumente apresentado em estudos iniciais, como os raios de luz. Ao abordar os efeitos ondulatórios, essa nova informação interage

substantivamente com o conceito, já existente, de luz, sua concepção sobre luz é modificada, assimilando significativamente a antiga e a nova informação, tornando a sua estrutura cognitiva, sobre o conceito de luz, mais elaborada, mais inclusiva, pois agora sua concepção de luz inclui comportamento ondulatório, há a atribuição de novos significados. Em continuidade, o processo pode se repetir, mas então, por exemplo, incluindo o conceito de quantum de luz, havendo novamente, uma modificação na estrutura cognitiva do aluno, se ocorrer a aprendizagem significativa.

A assimilação é, pois, um processo no qual uma nova informação I, potencialmente significativa, interage com subsunçores *específicos* da estrutura cognitiva de quem aprende.

Após a ocorrência da aprendizagem significativa, Ausubel considera que a dinâmica que a sucede, a retenção e o esquecimento das informações assimiladas, estão relacionados à dissociação do produto interacional A'a', na seguinte forma:

$$A'a' \longleftrightarrow A' + a'$$

Devido a essa dissociação, a' ainda pode ser identificável, pois não perde sua identidade. Isso permanece por um período de tempo variável, mas que favorece a retenção de a', permitindo que ainda seja reproduzível como uma entidade individual, ou seja, dissociável da idéia âncora modificada A'. À medida que o tempo passa, há uma perda progressiva de dissociabilidade e conseqüente obliteração de a', permanecendo somente a idéia mais inclusiva A'. Dessa forma, após a aquisição de novas informações, adquiridas no processo de assimilação, inicia-se uma nova etapa que Ausubel denomina *subordinação obliteradora* (AUSUBEL, 1980), como uma forma de explicar o processo de redução da memória, ou seja, o esquecimento. “É mais simples e econômico reter idéias, conceitos e proposições mais gerais e estáveis do que as novas idéias assimiladas” (MOREIRA, p. 27,

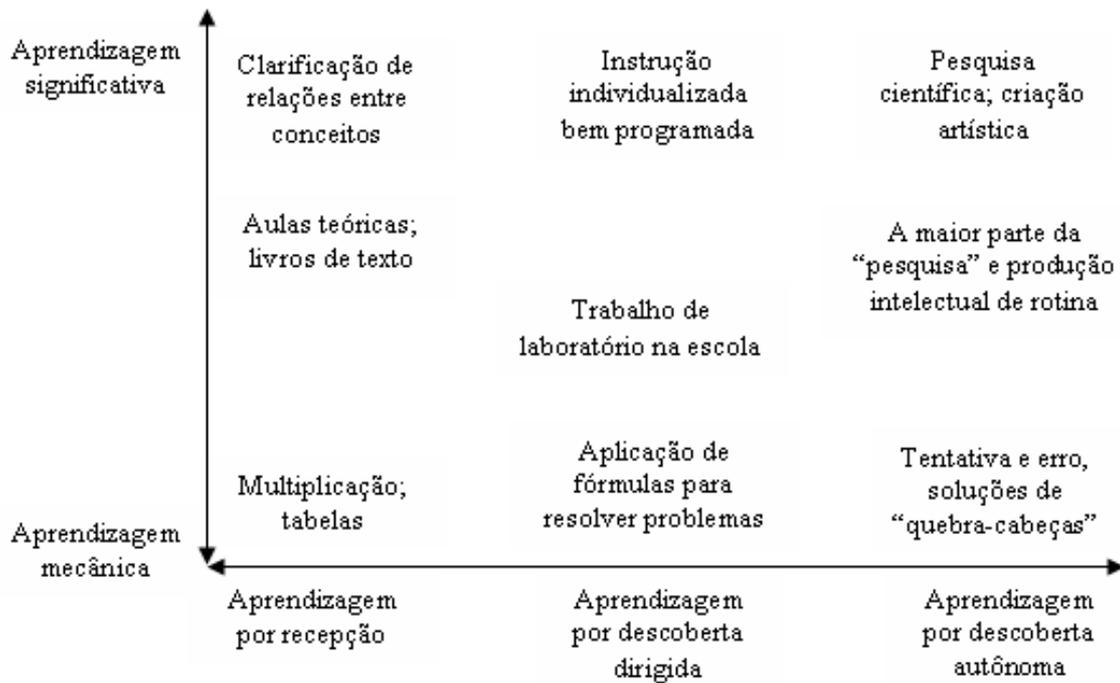
1999). Registre-se, no entanto, que não se trata de um esquecimento total, pois de alguma forma a' está em A' (que antes era A) e a reaprendizagem pode ocorrer de modo relativamente fácil e rápido.

O produto da aprendizagem significativa é a aquisição de novos significados. O sujeito que aprende é quem atribui significados à nova informação apresentada. Mas como fazer para verificar se ocorreu a aprendizagem significativa ? Ausubel responde a esta questão sugerindo o seguinte: a maneira com a qual o professor pode avaliar se houve aprendizagem significativa é apresentar questões novas, que não sejam familiares ao aluno, de maneira que seja requerida “*uma transformação máxima do conhecimento existente*” (AUSUBEL, p.123, 1980). Tal atitude visa eliminar o risco da simulação da aprendizagem significativa, pois em Física, por exemplo, na resolução de problemas, se apenas forem apresentados problemas semelhantes aos alunos, o vínculo entre o que foi ministrado pelo professor pode ser tal que pode haver uma confusão entre as aprendizagens significativa e mecânica, ou seja, o aluno pode simplesmente ter memorizado os procedimentos para a solução de problemas de mesmo tipo, resolvendo-os mecanicamente. Não obstante, é necessário ter consciência dos níveis e da diversidade de problemas que podem ser apresentados, o que acaba por exigir do professor atenção especial na sua habilidade em elaborar problemas de Física, quando pretende fazer a avaliação. Repetindo, de acordo com Ausubel, a melhor maneira de avaliar se a aprendizagem foi significativa, é propor novas questões que não sejam familiares aos alunos, requerendo, portanto, máxima transformação do conhecimento adquirido (MOREIRA, 1999).

3.2 - Aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica: os dois extremos de um continuum

A aprendizagem significativa é o objetivo de todo ensino, sob a ótica da teoria ausubeliana, e, como já foi mencionado, ocorre quando novas informações interagem com

proposições específicas relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz de forma não-arbitrária e não-literal. Em contraposição, Ausubel define a aprendizagem mecânica (ou automática), que ocorre quando o aluno apenas memoriza a nova informação, não havendo, portanto, interação substancial e específica com os subsunçores, não havendo atribuição de significados ao conteúdo apresentado. Porém, como já foi dito, esse tipo de aprendizagem não se dá em um *vácuo cognitivo*, já que pode haver alguma associação com a estrutura cognitiva, não na forma de interação, como na aprendizagem significativa, com algum subsunçor específico, caracterizando-se, apenas, por uma associação arbitrária. As diferenças entre esses tipos de aprendizagem são evidentes. Contudo, Ausubel não considera as aprendizagens significativa e mecânica como uma dicotomia, mas como dois extremos de um continuum. Com isso, apesar de ser preferida a aprendizagem significativa à mecânica, há determinadas ocasiões nas quais a aprendizagem mecânica precisa ser explorada, por uma questão de necessidade, por exemplo, na fase inicial da aprendizagem de um novo conteúdo. A concepção de um continuum para esses dois tipos de aprendizagens, também é aplicada por Ausubel a aprendizagem por recepção e por descoberta. Na primeira forma, o que deve ser aprendido é apresentado ao aluno na sua forma final, enquanto que na aprendizagem por descoberta, o conteúdo principal deve ser descoberto pelo aprendiz. Em qualquer um dos casos, a aprendizagem só será significativa se houver uma relação, não-arbitrária e não-literal, entre a nova informação e o conhecimento pré-existente da estrutura cognitiva do aluno, ou seja, se o novo conteúdo incorporar-se à estrutura cognitiva do aluno através da assimilação. Em virtude disso, a aprendizagem por recepção não pode ser considerada necessariamente mecânica e a aprendizagem por descoberta essencialmente significativa. A figura a seguir procura representar as relações entre a aprendizagem significativa, mecânica, por recepção e por descoberta, de acordo com algumas situações de ensino:



Fonte: MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa, p. 19. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1999

Figura 40: O continuum aprendizagem significativa e mecânica.

De acordo com esse esquema, a aprendizagem de operações básicas de multiplicação se enquadra na aprendizagem por recepção, pois o conteúdo é fornecido ao aluno, e se caracteriza em uma aprendizagem mecânica, pois a tendência inicial é a de o aluno decorar toda a tabela de multiplicação. Em outro extremo, a pesquisa científica se encaixa na aprendizagem por descoberta, pois o conhecimento é descoberto ao longo da pesquisa, como toda pesquisa está fundamentada por uma teoria, o novo conteúdo interage com esse conhecimento prévio, resultando na aprendizagem significativa. Contudo, tanto na aprendizagem por recepção como na por descoberta, a aprendizagem só será significativa se o material apresentado ao aluno se relacionar à sua estrutura cognitiva de forma não-arbitrária e não-literal. Assim sendo, a aprendizagem por recepção não é necessariamente mecânica e a aprendizagem por descoberta não é certamente significativa.

As principais formas de aprendizagem significativa são: aprendizagem subordinada e aprendizagem superordenada. A aprendizagem subordinada corresponde ao que já foi

descrito sobre a aprendizagem significativa, ocorre quando os novos conceitos assimilados ocupam uma posição subordinada em relação aos conceitos subsunçores, a nova informação potencialmente significativa interage de forma substantiva e não-arbitrária com conceitos, proposições relevantes da estrutura cognitiva do sujeito. A aprendizagem subordinada pode ser dividida em dois tipos: a derivativa e a correlativa. No caso da derivativa, é quando a nova informação serve como um exemplo, uma corroboração ou ilustração de um conceito pré-estabelecido na estrutura cognitiva. A aprendizagem subordinada correlativa é aquela na qual um conceito ou proposição já existente na estrutura cognitiva torna-se mais qualificado, estendido, elaborado.

A aprendizagem superordenada ocorre quando um novo conceito mais geral e potencialmente significativo A integra os demais a, b, c, já existentes na estrutura cognitiva, ou seja, o sujeito conhece, por exemplo, vários tipos de animais (cão, gato, vaca, etc.) e adquire o conceito de mamíferos, essa lista de animais é agrupada pelo novo conceito. Há uma terceira forma chamada aprendizagem combinatória que, como o nome sugere, ocorre quando a nova informação não tem uma relação subordinada ou superordenada com os subsunçores, mas relaciona-se com a estrutura cognitiva de uma maneira geral.

3.3 – Subsunçores e as condições para a aprendizagem significativa

A teoria ausubeliana para a aprendizagem focaliza o conhecimento prévio do sujeito que aprende, de tal forma que considera este o fator determinante para a aquisição de novas informações, podendo resultar na atribuição de significados a novos conhecimentos. São os subsunçores, presentes na estrutura cognitiva do aprendiz, que servirão de ancoradouro para o conteúdo de um material potencialmente significativo. Esse conhecimento pré-existente pode ser na forma de imagens, símbolos, conceitos, proposições que já sejam significativos para o aluno (MOREIRA, 1999). As condições

para a ocorrência da aprendizagem significativa, como já foi mencionado, são duas: que o aluno se predisponha a aprender e que o material apresentado seja potencialmente significativo. Essa segunda condição se relaciona com dois fatores: quanto à natureza do material em si, que deve ser *logicamente significativo*, ou seja, ser inteligível o suficiente para haver a possibilidade de se relacionar de forma substantiva e não-arbitrária a idéias relevantes existentes na estrutura cognitiva do sujeito, e quanto à natureza da estrutura cognitiva do aluno, isto é, nela devem existir os subsunçores adequados para servirem de ancoradouro para a nova informação. O indivíduo atribui significado psicológico a um material potencialmente significativo, se possui subsunçores específicos para que novas informações com eles se relacionem, é, portanto, uma experiência idiossincrática. Em outras palavras, para o material ser potencialmente significativo, depende de dois pré-requisitos: a) dever ser logicamente significativo e b) que o aluno seja capaz de atribuir significado psicológico ao seu conteúdo; possuir os subsunçores adequados.

Para Ausubel, a conceitualização se inicia na infância através de um processo de formação de conceitos e progressivamente passa a ocorrer por assimilação ao longo do tempo de aprendizado. Entretanto, há ocasiões nas quais não existem os subsunçores específicos para a aquisição de novos conteúdos. Esse é o momento de retomarmos a questão levantada no início deste capítulo: como prosseguir em direção e sentido da aprendizagem significativa, quando da inexistência dos subsunçores adequados ? Para resolver esse problema, Ausubel propôs os *organizadores prévios* para suprir a falta de subsunçores adequados. Um organizador prévio é um material apresentado antes do conteúdo propriamente dito, que tem o objetivo de servir como *ponte cognitiva* entre aquilo que o aluno já sabe e o que precisa saber para aprender significativamente a nova informação. É caracterizado por ser mais abstrato, geral e inclusivo do que o conteúdo a ser aprendido, tendo como função facilitar a aprendizagem significativa (MOREIRA,

1999). Ausubel sugeriu os organizadores prévios na tentativa de suprir a falta de subsunçores adequados para a aprendizagem significativa, propondo o uso desses materiais para servir de ancoradouro à nova informação e levar ao desenvolvimento de subsunçores. Os organizadores prévios não são introduções ou sumários do assunto a ser estudado. Eles podem se referir, por exemplo, a informações sem relação explícita ao conteúdo a ser estudado, mas que os alunos reconheçam tais informações. Pode-se considerar, por exemplo, a apresentação de um material sobre corridas de automóveis, antes de introduzir conceitos como inércia, força e aceleração centrípeta, velocidade escalar média, etc.

A fim de reunir alguns conceitos da teoria ausubeliana, foi construído um mapa conceitual, apresentado na figura 41:

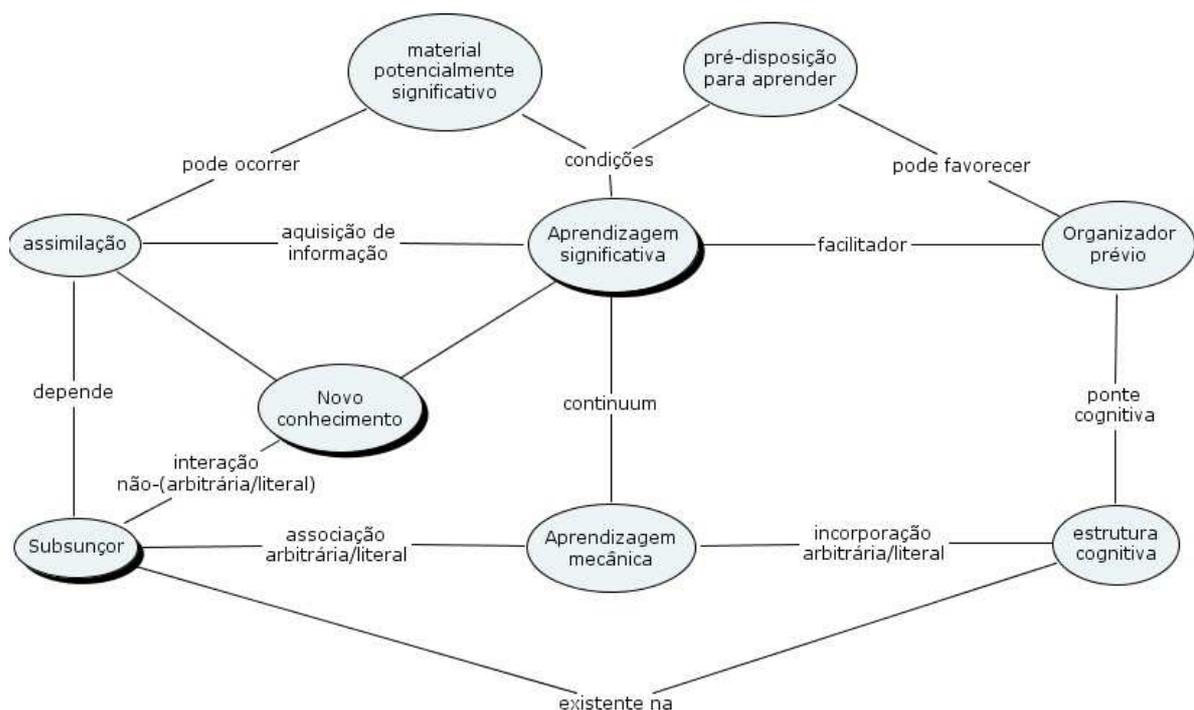


Figura 41: Um mapa conceitual para a teoria de aprendizagem de David Ausubel.

Neste mapa conceitual, procurou-se reunir os conceitos que melhor identificam a teoria de Ausubel. Temos que os conceitos principais estão dispostos nas elipses sombreadas: aprendizagem significativa, novo conhecimento e subsunçor. Considerando

que, para Ausubel, o fator que determina a aprendizagem de uma nova informação é aquilo que o aluno já sabe, ou seja, são os subsunçores. O objetivo do ensino é a aprendizagem significativa. Acima, estão os conceitos de potencialmente significativo e a pré-disposição para aprender, ambos se referem às condições para que ocorra a aprendizagem significativa. O organizador prévio serve como facilitador da aprendizagem significativa e a aquisição de novas informações se dá por assimilação, portanto, relaciona-se diretamente com o conceito central. Uma vez que Ausubel considera que as informações estão hierarquicamente organizadas na mente do indivíduo, surge o conceito de estrutura cognitiva, que comporta organizadamente os subsunçores. Na parte inferior do mapa, está o conceito de aprendizagem mecânica, relacionado à significativa, na forma que o autor apresenta, como os dois extremos de um continuum. A associação arbitrária e literal com os subsunçores da estrutura cognitiva do aprendiz caracteriza a aprendizagem mecânica. Com este mapa conceitual, encerramos a descrição do marco teórico deste trabalho.

4 – CONSTRUÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA

Neste capítulo, é apresentado detalhadamente todo o processo da pesquisa, seu delineamento, os objetivos e o objeto de estudo, as características do instrumento de pesquisa, os testes inicial e final, bem como os procedimentos adotados e as dificuldades enfrentadas durante o período de investigação.

4.1 – Objetivos e o objeto de estudo

Objetivo geral

Investigar as possíveis dificuldades enfrentadas pelos estudantes no aprendizado de conceitos da Óptica Física e implementar uma estratégia didática que os ajude a superá-las.

Objetivos específicos

Identificar as dificuldades na aprendizagem dos efeitos atribuídos ao comportamento ondulatório da luz pelos alunos de graduação matriculados na disciplina Física Geral e Experimental IV da UFRGS;

- evidenciar as possíveis dificuldades na compreensão dos conceitos envolvidos;
- delinear e implementar, em sala de aula, uma estratégia didática, baseada na teoria da aprendizagem significativa, para superar tais dificuldades.

O objeto de estudo desse trabalho, é a utilização de mapas conceituais, elaborados pelos alunos de graduação em Física, durante os estudos sobre os conceitos da Óptica Física, a saber: natureza ondulatória da luz, interferência, coerência, difração e polarização.

4.2 – Delineamento experimental da pesquisa

A investigação foi realizada com estudantes de graduação em Física, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), matriculados na disciplina de quarto semestre, Física Geral e Experimental IV, no segundo semestre de 2005 e no primeiro semestre de 2006. O *grupo de comparação*, composto por estudantes de Engenharia, em decorrência de não haver alunos de Física suficientes para compor os dois grupos, foi formado pelas turmas de Física IV - C, na qual também são abordados os conceitos de Óptica Física, nos mesmos semestres. O delineamento da pesquisa tomou a seguinte forma:

O ₁	X	O ₂
O ₁		O ₂

Onde O₁ e O₂ são os testes inicial e final, respectivamente, e “X” o tratamento didático do grupo experimental.

Que é um delineamento do tipo *quasi-experimental* (CAMPBELL e STANLEY, 1963).

Os escores obtidos nas duas fases de aplicação do teste foram analisados com o auxílio de teste estatístico, descrito à *posteriori*, para comparar os desempenhos dos dois grupos nessas duas etapas da aplicação do teste, a fim de verificar se há diferença estatisticamente significativa entre eles. Além disso, foi realizada uma análise qualitativa, a partir dos mapas conceituais e das observações juntos aos alunos do grupo experimental, com o intuito de complementar a análise estatística. Essas duas análises são apresentadas no capítulo cinco.

4.3 – Elaboração de instrumentos de pesquisa

O processo de construção de instrumentos de pesquisa é uma tarefa extensa e criteriosa. A simples elaboração de um conjunto de questões e sua aplicação não garante, de forma alguma, a validade da medida. No contexto da pesquisa, sempre há a necessidade

de conhecer o que o instrumento realmente está medindo. Os testes do tipo “papel e lápis”, por exemplo, são instrumentos de pesquisa em ensino usados na coleta de dados e, como qualquer outro, precisam ser confiáveis, isto é, ser *válidos* e *fidedignos*¹¹. Dos diferentes tipos de validade (concorrente, conteúdo, construto, etc.), a de *conteúdo* é a que mais interessa para testes em educação (MOREIRA e SILVEIRA, 1993). Um teste educacional tem validade de conteúdo se suas questões representam, adequadamente, o conteúdo selecionado. Seja, por exemplo, um teste para identificar os conhecimentos dos alunos sobre algum tópico de Física. Se esse instrumento apenas exigir cálculos extensos e complicados, sua validade de conteúdo estará relacionada a conhecimentos de Matemática, não servindo, portanto, para analisar os conhecimentos sobre determinado conteúdo de Física. Uma forma de verificar a validade de conteúdo de um instrumento é submetendo-o ao julgamento de diferentes examinadores, especialistas na área de interesse, que analisam a representatividade de cada item e seus objetivos. Outra característica importante do instrumento é a sua *fidedignidade*, relacionada à estabilidade dos dados obtidos em diversas aplicações. Um teste fidedigno deve ser capaz de reproduzir os mesmos resultados quando aplicado em um determinado grupo nas mesmas condições de sua aplicação inicial. Cabe destacar que, em pesquisas envolvendo indivíduos, dificilmente teremos o grupo em condições idênticas para a aplicação de testes, pois existem diversos fatores, como pessoais, que influenciam nas condições do momento de aplicação dos testes. Há várias formas de avaliar a fidedignidade de instrumentos de pesquisa, em especial os métodos de consistência interna, que estimam o *coeficiente de fidedignidade* do instrumento. Uma das maneiras é através do cálculo do coeficiente alfa (α) de Cronbach, adotado para este estudo. O coeficiente de fidedignidade pode assumir valores no intervalo fechado 0 e 1. Em estudos nos quais é feita a comparação de grupos em médias, tolera-se valores de “ α ”

¹¹ Algumas vezes encontramos o termo “validação do instrumento”, reunindo os dois critérios.

da ordem de 0,7. Entretanto, o valor desse coeficiente é afetado pela heterogeneidade da amostra, quanto mais heterogênea a amostra for, maior será o coeficiente alfa, não podendo, portanto, ser atribuído como característica exclusiva do instrumento. Isso significa que um instrumento com alto coeficiente é capaz de discriminar entre os indivíduos da amostra. A partir dessas considerações, pode-se afirmar que não existe “validação absoluta” do teste, mas apenas evidências de que o instrumento é válido para um determinado grupo respondente inserido em um contexto específico (MOREIRA e SILVEIRA, 1993).

4.2.1 – O instrumento¹² de pesquisa

O instrumento de pesquisa utilizado nesse estudo, um questionário do tipo item de múltipla escolha, foi construído enfocando os conceitos da Óptica Física já citados. Inicialmente, foram elaboradas 25 questões, que continham de quatro a cinco alternativas, sendo apenas uma correspondendo à opção correta. A composição inicial do teste pode ser visualizada no apêndice A. Durante o processo de elaboração do questionário, foram consideradas as principais concepções alternativas sobre os conceitos da Óptica Física, identificadas na literatura, conforme apresentado no segundo capítulo.

O processo de validação do instrumento utilizado nessa pesquisa, constituiu-se em duas etapas. Na primeira etapa, o questionário foi submetido à avaliação crítica de quatro Professores Doutores em Física, vinculados ao Instituto de Física da UFRGS, que analisaram todas as questões. As modificações sugeridas por estes professores foram feitas, a fim de satisfazer o critério de validade de conteúdo e manter a coerência das questões com os objetivos do estudo. Para tanto, as questões que envolviam concepções sobre a natureza corpuscular da luz foram excluídas (questões 1, 7 e 9) Na segunda etapa, o teste

¹² Nesse contexto, considera-se *instrumento* como o teste utilizado para a coleta de dados na Pesquisa em Ensino.

foi aplicado em alunos de Engenharia, matriculados na disciplina de Física IV – C e Física III – D, que também aborda os conceitos da Óptica Física. Após o início do período de aplicação do teste com as turmas de estudantes de Engenharia, as questões 10 e 11 também foram desconsideradas, pois apenas exigem o reconhecimento e o domínio da representação gráfica de duas ondas, não abordando os conceitos de interesse dessa investigação de forma compatível com a proposta de estudo.

Com o intuito de expandir e qualificar o processo de validação, o teste também foi aplicado a alunos do curso de graduação em Física, que já haviam cursado a disciplina de Física Geral e Experimental IV, na qual também são abordados os tópicos sobre Óptica Física. Com isso, a aplicação do teste foi realizada em situações de pré-teste e pós-teste, contando com 118 alunos no total. Cada aplicação do teste durou, aproximadamente, 40 minutos. Com os escores obtidos, foi possível estimar o coeficiente de fidedignidade (alfa de Cronbach), conforme apresentado na tabela 1:

Tabela 1: coeficiente de fidedignidade

Itens	Correlação item-total	Alfa de Cronbach
1	0,465	0,887
2	0,393	0,889
3	0,276	0,891
4	0,391	0,889
5	0,601	0,883
6	0,558	0,884
7	0,608	0,883
8	0,487	0,887
9	0,578	0,884
10	0,776	0,878
11	0,587	0,883
12	0,618	0,882
13	0,435	0,888
14	0,587	0,883
15	0,491	0,886
16	0,482	0,887
17	0,618	0,882
18	0,600	0,883
19	0,555	0,884
20	-0,122	0,900

A terceira coluna dessa tabela apresenta os valores do coeficiente alfa no caso de a questão correspondente, indicada pela primeira coluna, ser excluída. De acordo com os métodos de consistência interna, os itens que possuem baixa correlação item-total devem ser eliminados, o que aumenta o valor do coeficiente alfa. Observando a tabela anterior, o item 20 tem correlação item-total -0,122, e poderia ser considerado como um item “ruim”, ou seja, incapaz de medir o conhecimento desejado. Entretanto, sua baixa correlação é,

provavelmente, devido a ser a única questão que não contém conceitos em suas alternativas, mas expressões matemáticas. Analisando esse item após as aplicações do teste, decidiu-se mantê-lo, pois o mesmo foi capaz de identificar uma das concepções alternativas existentes, referentes ao conceito de polarização da luz: “somente o campo elétrico é polarizável”. Concepção que pode ser identificada na maioria dos estudantes, inclusive, nos que responderam as questões em situação de pós-teste. Além disso, mesmo mantendo essa questão, o valor do coeficiente alfa não sofre grande alteração, como pode ser observado a seguir:

Tabela 2: Coeficiente de fidedignidade do instrumento de pesquisa

Alfa de Cronbach	N de itens
0,891	20

Dessa forma, a composição final do pré-teste permaneceu com 20 questões, que pode ser visualizada no apêndice B.

4.4 – O tratamento do grupo experimental

Os alunos do grupo experimental (distribuídos em três turmas: A, B e C) assistiram às aulas conforme programa especificado para a disciplina de Física Geral e Experimental IV, durante o segundo semestre de 2005, e participaram das atividades realizadas com os mapas conceituais durante os horários de aula, em acordo com o professor da disciplina. Os encontros com os alunos aconteceram nos dias 05, 10, 17, 26, e 31 de outubro e nos dias 16 e 21 de novembro de 2005, que deveriam durar entre trinta e quarenta minutos do horário de aula, sendo o mesmo dia para todas as turmas. No primeiro encontro com os alunos, foi distribuído um material versando sobre mapas conceituais, momento em que foi possível explanar destacando suas características, objetivos e aplicações, apresentando alguns exemplos, de maneira que os alunos fossem aproximados dessa técnica de estudo, já

que nenhum dos alunos conhecia esse tipo de diagrama. Além disso, os alunos também receberam outro material de apoio que apresentava a luz como uma onda eletromagnética, introduzindo o conceito de polarização linear. No segundo encontro, quando os alunos já haviam iniciado os estudos sobre Óptica Física, correspondendo à terceira área da disciplina, houve a primeira atividade: no final da aula, os alunos foram convidados a traçar um mapa conceitual envolvendo os conceitos que haviam estudado até o momento. Nessa ocasião, foi sugerido que os mapas poderiam ser elaborados individualmente ou em grupos de, no máximo, três alunos, a fim de não prejudicar a participação de todos. Como as atividades foram desenvolvidas durante o horário de aula, à medida que os mapas eram elaborados, as dúvidas que surgiam nos alunos eram discutidas, fazendo com que os mapas fossem explicados. Obviamente, o processo continuava na aula seguinte devido à falta de tempo. As turmas A e B, que pertenciam ao turno da manhã, estudavam juntas, o que permitiu reunir em torno de trinta alunos no primeiro dia de interação. Nos encontros seguintes, os alunos receberam materiais de apoio, elaborados, principalmente, a partir do livro texto da disciplina¹³. Dessa forma, os alunos podiam traçar os mapas conceituais considerando, não apenas os conteúdos apresentados durante as aulas, mas também o material distribuído. A necessidade de distribuir materiais desse tipo surgiu desde o início das atividades, por dois motivos: a) nem todos os alunos estavam com o livro em sala de aula, mas apenas com as anotações em seus cadernos; b) incentivo à participação dos estudante. Além disso, outra estratégia adotada, na tentativa de garantir a participação dos alunos, foi a elaboração e distribuição de material contendo problemas resolvidos e comentados sobre Óptica extraídos do livro texto, mantendo-os à disposição, sob forma de monitoria não-oficial da disciplina. Os textos oferecidos aos alunos podem ser visualizados no apêndice F.

¹³ O livro texto comumente adotado para a disciplina é o “Fundamentos de Física 4 – Halliday, Resnick & Walker – 4º edição”

Contudo, já na segunda semana de atividade, iniciou-se um processo de morosidade e desistência na participação dos estudantes. Situação que se agravou, pois a maioria dos alunos deixava a sala de aula, a cada nova atividade, informando que não estavam interessados em participar das atividades sugeridas. Apesar disso, os trabalhos continuaram com aqueles alunos que tiveram interesse. Apenas sete alunos das turmas diurnas permaneceram com algum interesse em participar na elaboração de mapas conceituais. No terceiro encontro, quando permaneceram em sala de aula apenas quatro alunos (os demais, que ainda participavam das atividades não haviam comparecido a aula, por motivos desconhecidos), foi sugerida a elaboração de um mapa conceitual a ser traçado no “quadro negro” que considerasse, inicialmente, os conceitos de campo, polarização e luz. Assim, a partir das concepções dos alunos, o mapa conceitual era desenvolvido seguido de discussões sobre as relações e significados conceituais. A experiência dessa atividade foi importante, pois demonstrou que os alunos estavam motivados em participar da discussão sobre os conceitos que estavam sendo relacionados de forma que todos podiam visualizar claramente. Em alguns momentos, o professor da disciplina também contribuía para a participação dos estudantes, questionando-os sobre as relações conceituais. Além disso, foi possível identificar a dificuldade em conceber a polarização do campo magnético. O mapa conceitual que resultou dessa atividade pode ser visualizado na figura 42:



Figura 42: Um mapa conceitual sobre alguns conceitos da Óptica Física.

A partir da discussão deste mapa conceitual foi possível abordar as relações entre os campos elétrico e magnético, com a polarização linear, que a luz visível também pode sofrer, e o grau de polarização linear, produzida por reflexão, discutindo as relações pelo ângulo de Brewster. É interessante destacar que os alunos não sugeriram o conector entre campo magnético e polarização linear durante a elaboração do mapa, reforçando a concepção de que somente o campo elétrico pode estar polarizado.

Os alunos da turma C, que assistiam às aulas noturnas, não concordaram em elaborar os mapas conceituais durante o horário de aula, e sugeriram chegar à sala de aula com os mapas prontos para a discussão. Apesar de comum acordo, no segundo encontro, nenhum dos alunos havia elaborado o mapa conceitual. Apesar disso, recebiam o mesmo material de apoio já distribuído para os alunos das turmas A e B. Nos encontros nos quais não houve apresentação de mapas conceituais, apresentava-se o material de apoio,

destacando a importância de estudar a parte conceitual da disciplina fazendo uso dos mapas conceituais. Ademais, os alunos também eram instigados em pensar nas relações de conceitos como interferência e coerência, por exemplo, se construíssem um mapa conceitual, relacionariam ou não esses conceitos e por qual motivo. Mesmo em interações desse tipo, foi possível verificar que os alunos, em geral, têm dificuldade em explicar a parte conceitual da teoria científica. Próximo ao final do semestre, os alunos dessa turma começaram a entregar os mapas conceituais, entretanto, nem todos puderam ser debatidos, devido ao término das aulas.

Considerando a grande dificuldade com a participação dos estudantes e as várias desistências, tornou-se evidente a necessidade de realizar a investigação durante dois semestres consecutivos.

Em novo contato com o professor regente da disciplina, foi possível definir uma nota de participação para os alunos que se dispusessem a participar das atividades com os mapas conceituais ao longo desse novo semestre. Os alunos poderiam receber um score, que podia assumir o valor de até dois pontos, atribuído no final do semestre, na média das notas dos relatórios das atividades de laboratório, a cargo do próprio professor.

Da mesma forma que no semestre anterior, no primeiro encontro com os alunos, de todas as turmas, ocorrido em 20 de março de 2006, o material versando sobre o que são os mapas conceituais foi distribuído, acompanhado de explicações sobre suas aplicações e características e outro que apresentava a luz como uma onda eletromagnética, assim como a apresentação da pesquisa e as intenções de trabalho e objetivos. Também foi distribuído o material contendo os problemas resolvidos e comentados, com o intuito de despertar o interesse dos alunos na participação das atividades. Os alunos concordaram em elaborar os mapas conceituais, que deveriam ser entregues ao professor da disciplina, para posterior discussão em sala de aula. Nesse mesmo dia, foi sugerida a elaboração do primeiro mapa

conceitual, que considerasse o conteúdo da primeira área, sobre ondas eletromagnéticas. Ficou definido que este mapa deveria ser entregue antes de iniciar os estudos sobre Óptica Física, que estavam previstos para iniciar, aproximadamente, um mês depois. Apesar de a participação garantir pontuação adicional no desempenho dos estudantes, a maioria entregou com atraso os mapas conceituais, o que prejudicou o início das discussões. Em 25 de maio, apenas quatro alunos das turmas do A e B haviam entregado seus mapas conceituais. Os alunos da turma C, do turno da noite, ainda não haviam elaborado nenhum mapa conceitual. Nesse dia, foi-lhes distribuído um material sobre interferência, acompanhado de um “CD” (compact disc), contendo os materiais já distribuídos, e o software gratuito “CmapTools” (disponível no site <http://cmap.ihmc.us/>), a fim de incentivar os alunos a participar dos trabalhos, elaborando os mapas conceituais com o auxílio do computador, para aqueles que assim preferissem. Além disso, foi feita a apresentação de um mapa conceitual sobre a Óptica Geométrica, demonstrando a facilidade em trabalhar com o instrumento e sua importância para a compreensão dos conceitos envolvidos, além de evidenciar a sua necessidade de explicação. No dia 31 de maio, os mapas dos quatro alunos das turmas da manhã foram discutidos. Foi solicitado aos alunos autores dos mapas que os explicassem, permitindo a participação de todos, inclusive daqueles que ainda não haviam elaborado o mapa conceitual. Ademais, os alunos receberam o mesmo material distribuído aos alunos da turma C no dia 25 de maio.

Durante as interações com os alunos os professores da disciplina permaneciam presentes na sala de aula e incentivavam a participação de todos os alunos, inclusive quando as discussões eram realizadas.

Somente em 14 de junho é que foi possível a discussão dos mapas conceituais de alguns alunos da turma C. Os novos encontros com os alunos ocorreram nos dias 21, 26 e

28 de junho. Na primeira semana do mês de julho o teste final foi aplicado, não havendo mais tempo hábil para discutir alguns mapas conceituais que foram entregues tardiamente.

Durante as discussões dos mapas conceituais, foi possível envolver a maioria dos alunos que estavam presentes, pois foram distribuídas cópias dos mapas para todos os alunos, permitindo que pudessem analisá-los em conjunto.

É importante salientar que em todas as atividades com os mapas conceituais traçados pelos alunos, as questões referentes às discussões desses mapas envolviam as dificuldades identificadas no teste inicial, como, por exemplo, a sugestão de inclusão de um “conceito-problema”¹⁴. Os mapas conceituais elaborados pelos alunos podem ser visualizados no apêndice E.

Apesar da grande colaboração dos professores da disciplina, que procuravam estimular os alunos em participar na elaboração dos mapas conceituais, a grande dificuldade na realização dessa pesquisa, foi a resistência de alguns alunos em participar das atividades, mesmo quando ficou definido uma nota de participação, alguns estudantes não quiseram participar dos trabalhos. Outro problema constante, era a demora na entrega dos mapas conceituais, que resultava em reduzir o tempo para as discussões dos mapas. Mesmo assim foi possível contabilizar a participação, efetiva, de 34 alunos na estratégia dos mapas conceituais.

¹⁴ Define-se de “conceito-problema”, aquele no qual o aluno tenha apresentado dificuldade (identificada no pré-teste) ou relacionado à concepção alternativa.

5 - RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de pesquisa, a aplicação dos testes inicial e final, analisando quantitativamente os dados obtidos, comparando os desempenhos dos dois grupos, utilizando o pacote estatístico *SPSS 12.0 for windows standard license* e o *Microsoft Office Excel 2003*. Além disso, é apresentada uma descrição qualitativa a partir dos mapas conceituais, amparada pelas observações realizadas ao longo das atividades em contato com os alunos do grupo experimental.

5.1 – Aplicação dos testes inicial e final

Na primeira semana de aula do segundo semestre de 2005, o questionário foi aplicado às três turmas da disciplina Física Geral e Experimental IV, discriminadas como turmas A, B e C. O pré-teste também foi aplicado no *grupo de comparação*, formado por alunos do curso de Engenharia, matriculados na disciplina Física IV - C. Da mesma forma, o teste foi aplicado na primeira semana de aula, do primeiro semestre letivo de 2006, às novas turmas de Física Geral e Experimental IV, ampliando o grupo experimental, e à nova turma da disciplina Física IV - C, para o grupo de comparação. A aplicação do teste durou aproximadamente 40 minutos. Ao final de cada semestre, o pós-teste foi aplicado aos dois grupos, a fim de obter dados que sirvam para avaliação do desempenho dos alunos. O pós-teste foi elaborado a partir do teste inicial, reordenando as questões e as alternativas, a fim de minimizar qualquer vínculo entre as duas aplicações. O formato do pós-teste pode ser visualizado no apêndice B. A aplicação do pós-teste durou, aproximadamente, 35 minutos.

O objetivo de cada questão, ou seja, o conceito envolvido está relacionado conforme exposto na tabela 3:

Tabela 3: Relação entre as questões e os conceitos abordados

CONCEITOS	ITENS
Natureza ondulatória da luz	1, 2, 3, 5
Difração	6, 13, 14, 15, 16
Interferência	4, 8, 9, 10, 11, 12, 13
Coerência	7, 12, 8, 9
Polarização	7, 12, 17, 18, 19, 20

De acordo com a tabela 3, um mesmo item pode abordar mais de um conceito, que, em alguns casos, está contido implicitamente na questão. Como são questões conceituais, em todas elas, o aluno deve ser capaz de identificar o conceito relacionado à situação apresentada pela questão e respondê-la satisfatoriamente. Em caso contrário, provavelmente, utilizará suas pré-concepções embasadas na experiência diária para escolher a resposta.

Os dados coletados durante as aplicações dos testes estão explicitados nas próximas tabelas.

Tabela 4: Respostas dos testes inicial e final do grupo experimental

ITENS	ALTERNATIVAS (Pré-teste N = 64)					BRANCO	acertos	ITENS	ALTERNATIVAS (Pós-teste N = 24)					BRANCO	acertos	
	A	B	C	D	E				A	B	C	D	E			
1	3	33	11	17			51,56%	17	1			23	1			95,83%
2	3		15	46			71,88%	7	2	1	8	1	14			58,33%
3	5	1	52	2	4		81,25%	18	3			9		14	1	58,33%
4	13	2	42	7			65,63%	8	4			24				100%
5	2	5	15	8	34		12,5%	9	5	5	18		1			75%
6	17	3	15	28		1	43,75%	19	6	2	14	4	4			58,33%
7	10	30	13	7		4	15,63%	20	7	7	2	6	2	3	4	25%
8	5	4	3	52			81,25%	12	8	5	2	3	2	8	4	33,33%
9	20	1	1	4	38		59,38%	1	9	6	1	1	16			66,67%
10	19	3	5		35	2	7,81%	2	10	3		20	1			83,33%
11	17	3	2	3	36	3	56,25%	3	11			2	21		1	87,5%
12	19	5	15	5	10	10	23,44%	4	12	7			17			70,83%
13	5	9	7	40		3	62,5%	5	13		19	2	2		1	79,17%
14	18	17	15	8	4	2	28,13%	6	14	6		3	14		1	58,33%
15	12	9	3	25	7	8	39,06%	10	15	4		4		16		66,67%
16	38	1	16	6		3	59,38%	11	16	6		18				75%
17	5	5	26	25		3	39,06%	13	17	3		19	2			79,17%
18	1	8	28	20	6	1	31,25%	14	18	6	3	14	1			58,33%
19	6	12	20	20	4	2	31,25%	15	19	3	6	1	4	7	3	29,17%
20	7	15	16	10	7	9	10,94%	16	20	8	1	15				62,5%

OBS: As células que contém números coloridos correspondem às respostas corretas.

A coluna do pós-teste que contém os caracteres verdes faz a relação com as questões do pré-teste.

Tabela 5: Escores dos testes inicial e final dos alunos do grupo experimental

Teste inicial							
8	11	3	9	5	7	9	7
9	5	15	6	10	10	12	12
10	7	7	7	10	8	11	8
13	9	7	13	4	8	9	9
8	8	10	6	11	14	4	8
12	11	14	9	10	12	12	8
3	9	8	4	3	7	8	12
10	9	6	6	11	11	8	8
Média: 8,72 - 43,60% do escore máximo							
Teste final							
13	17	15	14	12	18	6	6
9	16	14	17	12	16	15	11
14	17	14	12	11	11	13	14
Média: 13,21 - 66,04% do escore máximo							

De acordo com a tabela 5, a média do desempenho dos alunos é maior no pós-teste, o que já era esperado. Considerando que os dados não são pareados, o teste de comparação entre as duas amostras deve ser baseado na diferença entre as suas médias. O teste “t de student” para dados não pareados confere o nível de significância estatística para esse resultado:

Tabela 6: Comparação entre os testes inicial e final do grupo experimental

	Número de observações	Médias	Variâncias	Teste t	T crítico Bi-caudal	Significância Estatística (α)
Pré-teste	64	8,72	7,76	6,40	2,63	0,01
Pós-teste	24	13,21	10,23			

Como pode ser observado na tabela 6, a diferença entre as médias dos testes inicial e final possui um nível de significância estatística de 0,01, pois o valor calculado no teste “t” supera o valor do “t crítico”, ou seja, podemos afirmar que o desempenho dos alunos no teste final foi realmente melhor.

Conforme se verifica nas tabelas 4, 5 e 6, o número de alunos do grupo experimental sofreu uma grande redução. De um total de 64 alunos matriculados na disciplina, durante os semestres 2005/02 e 2006/01¹⁵, 34 participaram das atividades de elaboração dos mapas conceituais, mas apenas 24 responderam ao teste final, pois 10 alunos não compareceram à aula na qual o teste foi aplicado. Com base nisso, o teste “t” também foi aplicado, considerando dados pareados, utilizando os escores obtidos por esses 24 alunos que participaram dos dois testes.

¹⁵ Essa representação refere-se ao segundo semestre de 2005 e o primeiro semestre de 2006.

Tabela 7: Teste "t" para dados pareados a partir do grupo experimental

	Número de observações	Médias	Variâncias	Teste t	T crítico Bi-caudal	Significância Estatística (α)
Pré-teste	24	9,08	8,17	4,26	3,77	0,001
Pós-teste	24	13,21	10,08			

De acordo com a tabela 7, há um alto nível de significância estatística para a diferença entre as médias dos testes inicial e final, considerando apenas os 24 alunos que participaram das duas etapas de aplicação do questionário.

A tabela 8 explicita as escolhas dos alunos do grupo de comparação durante os testes inicial e final, apresentando a variação percentual das respostas corretas:

Tabela 8: Respostas dos testes inicial e final do grupo de comparação

ITENS	ALTERNATIVAS (Pré-teste N = 61)					BRANCO	acertos	ITENS	ALTERNATIVAS (Pós-teste N = 41)					BRANCO	acertos	
	A	B	C	D	E				A	B	C	D	E			
1	3	28	19	11		0	45,9%	17	1	1		21	19		0	51,22%
2	2	1	13	45		0	73,77%	7	2	8	18	5	8		2	19,51%
3		2	43	11	5	0	70,49%	18	3		6	16	2	17	0	41,46%
4	20	3	29	9		0	47,54%	8	4	2	2		33		4	80,49%
5	8	9	17	6	20	1	9,84%	9	5	13	25			3	0	60,98%
6	8	5	9	39		0	63,93%	19	6	2	19	8	11	1	0	46,34%
7	13	19	20	9		0	21,31%	20	7	19	6	1	6	8	1	2,44%
8	10	5	5	41		0	67,21%	12	8	13	1	5		22	0	53,66%
9	14	4	3	4	36	0	59,01%	1	9	4		10	27		0	65,85%
10	18	3	7	1	32	0	11,48%	2	10	2		32	7		0	78,05%
11	9	6	2	4	40	0	65,57%	3	11	1		6	31	3	0	75,61%
12	21	9	18	7	6	0	29,51%	4	12	14	3	2	22		0	53,66%
13	6	12	8	35		0	57,38%	5	13	2	27	7	2	3	0	65,85%
14	20	16	19	2	4	0	32,77%	6	14	3		7	31		0	75,61%
15	16	17	7	12	9	0	19,67%	10	15	15	1	3		22	0	53,66%
16	40	4	10	7		0	65,57%	11	16	9	6	24	1	1	0	58,54%
17	5	7	29	19		1	31,14%	13	17	9	8	19	5		0	46,34%
18	1	11	25	20	4	0	32,77%	14	18	5	5	25	5	1	0	60,98%
19	9	13	12	25	2	0	40,98%	15	19	6	5	5	6	19	0	46,34%
20	10	15	19	8	9	0	16,39%	16	20	9	1	31			0	75,61%

OBS: As células que contém números grifados correspondem às respostas corretas.

A coluna do pós-teste que contém os caracteres verdes faz a relação com as questões do pré-teste

Tabela 9: Escores dos alunos do grupo de comparação

Teste inicial									
15	12	10	9	10	8	8	11	8	8
9	5	9	8	8	5	4	9	7	9
8	8	15	10	14	5	10	11	12	9
7	10	7	13	9	6	9	11	9	4
8	13	8	10	4	7	8	4	10	7
10	9	8	6	9	7	10	10	5	7
7	Média: 8,62 – 43,11 % do escore máximo								
Teste final									
9	7	16	9	8	10	12	10	11	13
10	13	12	9	9	11	16	9	12	10
9	11	13	11	13	10	13	7	10	10
12	13	11	14	15	15	13	9	10	8
13	Média: 11,12 – 55,61% do escore máximo								

Com o mesmo raciocínio usado para analisar os escores do grupo experimental, pode-se verificar o nível de significância estatística para a diferença das médias dos escores obtidos nos testes inicial e final do grupo de comparação:

Tabela 10: Análise entre os testes inicial e final do grupo de comparação

	Número de observações	Médias	Variâncias	Teste t	t crítico Bi-caudal	Significância Estatística (α)
Pré-teste	61	8,62	6,44	5,06	2,63	0,01
Pós-teste	41	11,12	5,31			

A partir dos dados da tabela 10, verifica-se que a diferença entre as médias dos testes inicial e final do grupo de comparação também possui um nível elevado de significância estatística, o que demonstra que houve melhora real no desempenho dos alunos desse grupo no teste final.

Considerando que os dois grupos (experimental e de comparação) são constituídos por alunos de cursos diferentes, poder-se-ia pensar que são grupos totalmente distintos desde o início, o que poderia dificultar a análise estatística. Entretanto, o teste t de student, sendo função do desvio padrão, que é relacionado ao grau de heterogeneidade da amostra,

também pode demonstrar a equivalência de duas amostras, ou seja, se são representativas da mesma população (CAMPOS, 2001; BARBETTA, 2002). Com base nisso, o teste t foi aplicado aos escores obtidos no teste inicial com os dois grupos, a fim de verificar a equivalência desses grupos.

Tabela 11: Análise do desempenho no pré-teste dos grupos experimental e de comparação

Grupo	Observações	Média	Variância	Teste t	t-crítico	Significância estatística
Experimental	64	8,72	7,76	0,20	0,22	0,83
Comparação	61	8,62	6,44			

De acordo com as informações expostas na tabela 11, o valor do teste t, calculado a partir dos dados coletados, é inferior ao “t-crítico”. Os dados mostram, portanto, que não é possível afirmar, com satisfatório nível de significância estatística, que os dois grupos diferem entre si, que conduz a suposição de equivalência dos grupos experimental e de comparação.

5.2 – Análise do desempenho dos grupos experimental e de comparação

Na seção anterior, verificou-se que houve melhora no desempenho dos alunos do grupo experimental após a realização das atividades envolvendo os mapas conceituais. Entretanto, para atribuir relação entre o desempenho dos alunos e os trabalhos com os mapas conceituais, é necessário compará-lo com outro grupo que não tenha participado de tais atividades, o que anteriormente foi denominado de *grupo de comparação*. A tabela 12 reúne as respostas dos alunos dos dois grupos com a percentagem de acertos no teste final.

Tabela 12: Respostas do teste final dos grupos experimental e de comparação

ITENS	ALTERNATIVAS grupo experimental N = 24					BRANCO	acertos	ALTERNATIVAS grupo de comparação N = 41					BRANCO	acertos
	A	B	C	D	E			A	B	C	D	E		
1			23	1			95,83%	1		21	19		0	51,22%
2	1	8	1	14			58,33%	8	18	5	8		2	19,51%
3			9		14	1	58,33%		6	16	2	17	0	41,46%
4				24			100%	2	2		33		4	80,49%
5	5	17		2			70,83%	13	25			3	0	60,98%
6	2	14	4	4			58,33%	2	19	8	11	1	0	46,34%
7	7	2	6	2	3	4	25%	19	6	1	6	8	1	2,44%
8	5	2	3	3	7	4	29,17%	13	1	5		22	0	53,66%
9	6	1	1	16			66,67%	4		10	27		0	65,85%
10	3		20	1			83,33%	2		32	7		0	78,05%
11			2	21		1	87,5%	1		6	31	3	0	75,61%
12	7			17			70,83%	14	3	2	22		0	53,66%
13		18	3	2		1	75%	2	27	7	2	3	0	65,85%
14	6		3	14		1	58,33%	3		7	31		0	75,61%
15	4		4		16		66,67%	15	1	3		22	0	53,66%
16	6		18				75%	9	6	24	1	1	0	58,54%
17	3	1	19	1			79,17%	9	8	19	5		0	46,34%
18	6	3	14	1			58,33%	5	5	25	5	1	0	60,98%
19	3	6	2	4	6	3	25%	6	5	5	6	19	0	46,34%
20	8	1	15				62,5%	9	1	31			0	75,61%
						média	66,04%						média	55,61%

Com base nas tabelas 5, 9 e 12, pode-se observar que em média o desempenho dos alunos do grupo experimental é melhor do que o do grupo de comparação. Com isso, pode-se fazer a análise da variância (ANOVA) para a comparação dos dois grupos, com a razão F de Snedecor (NETO, 1995), que estima o nível de significância estatística da análise; quanto maior for o valor dessa razão, mais significativa é a diferença entre as variâncias, tornando possível discriminar os dois grupos.

Tabela 13: Análise do desempenho no pós-teste dos grupos experimental e de comparação

GRUPO	Observações	Média	Teste F	F crítico	Significância estatística
Experimental	24	13,2	1,90	1,80	0,05
Comparação	41	11,12			

Conforme exposto na tabela 13, o valor da razão F supera o seu valor crítico ao nível de significância 0,05. Isso significa que a hipótese nula, igualdade dos dois grupos, pode ser rejeitada, com erro de apenas 5%. 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, sendo, portanto, um resultado favorável ao seu uso ao longo desse processo.

5.3 – Descrição qualitativa

Nesse subcapítulo, é apresentada a análise qualitativa realizada a partir dos mapas conceituais, complementada pelas observações feitas em sala de aula, assim como a apresentação das principais dificuldades encontradas na aprendizagem dos efeitos atribuídos ao comportamento ondulatório da luz e os conceitos envolvidos.

5.3.1 – Concepções alternativas e dificuldades na aprendizagem de conteúdos da Óptica Física

A partir da aplicação do teste inicial, foi possível identificar algumas concepções alternativas sobre os conceitos da Óptica Física e algumas dificuldades, que também foram exploradas durante as interações em sala de aula. Inicialmente, foram analisadas as respostas dos dois grupos, sendo um total de 125 alunos, pois, dessa forma, foi possível tornar mais evidente as concepções mais representativas. Com base nesses dados, foi elaborada a tabela 14.

Tabela 14: Concepções alternativas identificadas

Conceitos	Concepções alternativas	Grupos		Total
		experimental	comparação	
Polarização	a) Somente o campo elétrico é polarizável; não concebem a polarização do campo magnético.	41	42	83
	b) A polarização consiste em definir uma direção preferencial de propagação da onda.	26	29	55
	c) Para que ocorra a polarização a onda deve ser eletromagnética, sem haver referência às ondas transversais.	28	25	53
Difração	a) Luz de fonte pontual não pode sofrer difração nas bordas de obstáculos, propagando-se sempre de acordo com a Óptica Geométrica.	17	8	25
	b) Se há difração, não ocorre interferência da luz. Não consideram que os efeitos possam ocorrer juntos em um mesmo evento.	9	12	21
	c) Somente ocorre quando o comprimento de onda é da ordem da largura da fenda.	16	10	26
Luz	a) É uma onda eletromagnética bidimensional	17	11	28
	b) É uma onda eletromagnética longitudinal	11	19	30
	c) Amplitude é que caracteriza a cor	15	13	28
Interferência	a) Somente pode alterar a amplitude da onda - não consideram a possibilidade de mudança da fase ou frequência da onda.	13	20	33
	b) Consideram que a sombra de um obstáculo não é bem definida nas extremidades devido exclusivamente ao efeito de interferência.	15	9	24
	c) A interferência destrutiva ocorre com diferença de fase igual a $\pi/2$.	17	9	26
Coerência				

Conforme pode ser observado na tabela 14, não foi encontrada nenhuma concepção alternativa que possa ser relacionada ao conceito de coerência. O que já poderia ser esperado, pois tal conceito não é abordado em estudos iniciais de Física, e é revelado pela aplicação do questionário, sendo reforçado pelas interações em sala de aula, que os alunos desconhecem o significado de tal conceito. As concepções alternativas mais frequentes estão relacionadas ao conceito de polarização. Isso sugere que esse conceito, nesse nível, ainda não é bem compreendido pelos alunos. Os estudantes mostravam-se surpresos quando, por exemplo, eram incitados a conceber a polarização do campo magnético. Mesmo após terem contato com o conteúdo da disciplina, era notável que alguns estudantes permaneciam com essa concepção. Também é importante destacar a dificuldade em identificar o que é uma onda longitudinal ou transversal, confundindo os dois conceitos. Essa dificuldade, provavelmente, está além de diferenciar ondas mecânicas de eletromagnéticas, mas de compreender que esta última é sempre transversal no espaço livre porque os campos elétrico e magnético oscilam em direções perpendiculares à direção de propagação. Além disso, uma quantidade significativa dos alunos considera que a difração só pode ocorrer em situações nas quais o comprimento da onda é da ordem da largura de uma determinada abertura. Em relação ao conceito de interferência, a concepção de que é apenas uma alteração na amplitude da onda, indica que desconhecem ou não consideram o caso mais geral, de ser possível haver alterações na fase e na frequência, além da amplitude.

5.3.2 – Análise qualitativa a partir dos mapas conceituais

Nesta seção é apresentada a análise qualitativa realizada sobre os mapas conceituais considerando as observações feitas em sala de aula. Para tanto, considerou-se uma das técnicas de análise de conteúdo, partindo das concepções de Laurence Bardin (2004), professora-assistente de Psicologia na Universidade de Paris V. No seu livro “Análise de

Conteúdo” a autora apresentada de forma clara e objetiva as características e variações dessa técnica de análise qualitativa, sem restringi-la a qualquer área de conhecimento, podendo ser adotado como livro básico de estudo. Segundo Bardin, a análise de conteúdo pode ser adotada para qualquer tipo de material de comunicação, em que haja alguma condução de *significações* entre um emissor e um receptor. Dessa forma, a análise de conteúdo pode ser uma análise dos significados, como, por exemplo, a *análise temática*. Como técnica qualitativa, é flexível na maneira em que o analisador aborda o conteúdo, ou seja, cada conteúdo possui suas características e pode ser abordado de forma diferente, de acordo com os objetivos do estudo. Entretanto, pode ser dividida em três partes organizadas, que, basicamente, são descritas como:

1) *Pré-análise*: que constitui a etapa na qual os documentos a serem analisados são escolhidos, além da formulação de hipóteses e objetivos. Ainda no período da pré-análise, é feita a “leitura flutuante”, uma leitura inicial em que o investigador fica aberto às impressões e orientações iniciais que o texto possa causar. Além disso, a autora sugere algumas regras básicas, entre elas: a) da exaustividade: é a regra complementada pela idéia de não-seletividade, ou seja, nenhum documento deve ser deixado de lado por motivo algum, todos os documentos envolvidos devem ser considerados durante a análise; b) da representatividade: o material escolhido para análise deve ser representativo do que se deseja investigar; c) da pertinência: os documentos, como fontes de informação, devem ser adequados, de modo a corresponderem com os objetivos do estudo. Ainda durante a pré-análise, também é feita a preparação do material, relacionada, por exemplo, a sua edição para posterior exploração.

2) *Exploração do material*: depois de concluída a pré-análise, essa etapa nada mais é do que a investida sistemática sobre o conteúdo do material, a fim de identificar, por exemplo, categorias nas quais as informações possam ser distribuídas.

3) *Tratamento dos resultados obtidos e interpretação*: no tratamento dos resultados podem ser adotadas algumas operações estatísticas básicas, como a estatística descritiva, para representar, como no caso da análise temática, a frequência com a qual surge alguma informação. A partir desses resultados significativos, torna-se possível fazer inferências e interpretações em relação aos objetivos do estudo.

Em um primeiro momento, foram identificados os conceitos mais frequentes apresentados nos mapas conceituais, relacionados na tabela 15:

Tabela 15: Frequência dos principais conceitos estudados

CONCEITOS	FREQÜÊNCIAS
Onda eletromagnética	23
Luz visível	20
Campos E e B	20
Equações de Maxwell	9
Polarização	19
Interferência	18
Coerência	12
Difração	17
Vetor de Poynting	16
Intensidade	17
Reflexão	15
Refração	12
Filme fino	10
Índice de refração	13
Fase	15
Comprimento de onda	11

Para a análise dos mapas conceituais elaborados pelos alunos, foi adotada a seguinte notação, a fim de fazer a discriminação entre cada trabalho:

MCN(n;n'), que significa "mapa conceitual número n" do(s) aluno(s) n e (n'). Os mapas conceituais podem ser visualizados no apêndice E, com a mesma codificação, sendo que são apresentados na primeira versão, ou seja, antes de quaisquer possíveis modificações que venham a ocorrer após serem discutidos com os alunos. Dessa forma, torna-se mais representativa a maneira com a qual os alunos estão fazendo as relações de

significado entre os conceitos apresentados nos mapas. Na maioria dos casos, as observações feitas a partir dos mapas de conceitos puderam ser reforçadas durante as discussões dos mesmos.

Mapa conceitual dos alunos 1 e 2:

No MC1(1;2) podem ser identificados os conceitos-chave: ondas eletromagnéticas, campos elétrico e magnético. Além disso, os alunos, ao apresentarem esse mapa conceitual, explicaram que as “Equações de Maxwell” representam a unificação de todo o eletromagnetismo e por isso foram adicionadas em um quadro junto de “ondas eletromagnéticas”. Quando foram questionados sobre o conector “limitação”, que liga o conceito de polarização com o de campo elétrico, explicaram que se refere em definir uma direção preferencial para a oscilação desse campo. Nota-se que nessa versão do MC1(1;2), não há relação entre os conceitos de polarização e campo magnético, pois os alunos inicialmente não consideravam a polarização desse campo. Isso é evidenciado ao observar que o conector “limitação” relaciona o conceito de polarização exclusivamente ao conceito de campo elétrico, como se o efeito pudesse ser atribuído somente a ele. Os alunos também foram instigados a explicar as possíveis relações entre os conceitos de energia e potência, intensidade média e polarização, já que não foram feitas no mapa. O MC2(1;2) foi elaborado com o software “cmaptools”, considerando como conceitos centrais os efeitos de difração e interferência e o de intensidade. A sugestão feita foi de adicionar o conceito de coerência, relacionado diretamente com interferência. Há relação direta entre difração e interferência, indicando que os estudantes reconhecem que esses efeitos podem ocorrer em um mesmo evento, exemplificando através do experimento de Young. A relação entre interferência e intensidade ocorre através dos tipos de interferência, apresentados como destrutiva e construtiva, destacando ondas de mesma fase ou defasadas. Nesse mapa

conceitual, percebe-se que os alunos tiveram preocupação em apresentar o conceito de fase como algo importante para a análise da interferência das ondas. Sendo isso uma das dificuldades encontradas, de acordo com a tabela 14. A elaboração desse mapa conceitual permitiu aos alunos analisar criticamente as relações entre as fases de ondas que interferem, explicitando-as durante a discussão do mapa.

Mapa conceitual do aluno 3:

Nesse mapa conceitual, pode-se observar que o estudante apresentou como conceitos centrais: ondas eletromagnéticas, luz visível e, subjacentes a eles, os de interferência e difração. Verifica-se que o estudante também abordou o conceito de fase e o caso de haver interferência e difração conjuntamente. Além disso, identificou o conceito de coerência relacionado diretamente com o de interferência. Isso demonstra que o aluno fez a relação adequada e necessária entre esses conceitos, já que as franjas de interferência são observadas se as ondas forem coerentes entre si. Também se constata que o aluno adicionou o “índice de refração”, sugerindo a mudança de meio de propagação para uma onda eletromagnética qualquer e, em particular, a luz visível. Essas apresentações no mapa representam a compreensão do aluno sobre a propagação de ondas eletromagnéticas, que podem encontrar obstáculos e difratarem - exemplo das ondas planas que se tornam esféricas após serem difratadas, conforme indicado nesse mapa – a possibilidade de mudança de meio e que alteração há no comprimento de onda. Além disso, há a conexão direta entre coerência e comprimento de onda. Esse conector indica que o aluno reconhece a relação entre o comprimento de onda e o de fase (sugerido ser adicionado no mapa), uma vez que se há coerência entre duas ondas, por exemplo, a diferença de fase é uma constante no tempo (coerência temporal) o que pode ser tratado em termos de comprimento de onda.

Outra sugestão para esse mapa foi de colocar o conceito de difração separadamente em uma elipse e aparecer apenas uma vez a interferência.

No MC2(3) são considerados os conceitos relacionados às características das ondas eletromagnéticas. Nesse mapa, o aluno não apresenta o conceito de coerência explicitamente, mas a relação entre os conceitos de tempo e fase, com o conector “constante”, indica que o aluno atribui significado ao conceito de coerência temporal, conforme explicado pelo mesmo. Além disso, a variação dos campos no tempo leva a composição das ondas eletromagnéticas. À direita do mapa, pode-se notar que o estudante procurou relacionar os conceitos que se referem às características das ondas eletromagnéticas, apresentando o conceito de luz visível como uma faixa do espectro eletromagnético. A partir das relações apresentadas entre “direção de propagação”, “vácuo” e “meio de propagação”, o aluno demonstra que sua concepção sobre propagação das ondas é adequada, sempre há perpendicularidade entre os campos no vácuo, mas a onda pode sofrer refração na mudança de meio, e mudar a direção de propagação. No MC3(3), o aluno reúne novamente os conceitos de onda eletromagnética e de campo, mas posiciona o de luz visível no topo do mapa, indicando que nesse momento está analisando essa faixa do espectro mais objetivamente. Ainda apresenta as características do MC2(3), mas adiciona o conceito de polarização e energia como conceitos-chave do mapa. Além disso, esse aluno apresenta os tipos de polarização. Compreende que qualquer onda eletromagnética pode ser polarizada, apesar de não ter conectado diretamente os conceitos de polarização e de onda eletromagnética, pois no conector, que leva aos tipos de polarização, considera que o campo elétrico e o magnético são polarizáveis. Isso demonstra que o aluno, ao elaborar o mapa, analisou criticamente o conceito de polarização, não considerando apenas um dos campos, conforme a concepção alternativa para este conceito.

Mapa conceitual do aluno 4:

O aluno 4 entregou seu mapa conceitual somente no final do semestre, sem tempo hábil para discuti-lo. Apesar disso e de não ter colocado nomes nos conectores, pode-se identificar o conceito-chave: onda eletromagnética. No lado direito do mapa, ainda apresentou conceitos da Relatividade, provavelmente por ter elaborado seu mapa conceitual durante a última área da disciplina, que aborda esses conceitos. O MC1(4) pode representar a falta de experiência na elaboração de mapas, pois o aluno apenas destaca o conceito que entende como central, mas não faz relações entre os outros conceitos, como, por exemplo, polarização e os campos. Contudo, poucas relações conceituais também podem indicar uma compreensão ainda insatisfatória do conteúdo, o que carece de discussões.

Mapa conceitual do aluno 5:

O MC1(5) é um mapa construído enfocando os conceitos de onda eletromagnética e de campo. Nessa versão, apesar de ser mais complexo do que o MC1(4), também não faz relação entre polarização e os campos elétrico e magnético. Apesar de ser próximo de um fluxograma, o aluno procurou reunir os conceitos que considera importantes no estudo sobre ondas eletromagnéticas. Além disso, apresenta como pode ocorrer a polarização e quais os tipos.

Mapa conceitual do aluno 6:

Nesse mapa conceitual, o aluno 6 consegue relacionar vários conceitos por conectores nomeados, isso indica que foi capaz de atribuir, explicitamente, significados entre as relações conceituais. Parte de conceitos como onda eletromagnética, campos elétrico e magnético e luz e faz a diferenciação até chegar aos tipos de polarização. Esse

aluno também relaciona, adequadamente, os conceitos de intensidade de placa polarizadora, indicando a redução da intensidade em (aproximadamente) 50 %.

Mapa conceitual do aluno 7:

O MC1(7) contém conceitos centrais destacados, que são: onda eletromagnética, propagação e luz visível, que faz referência à Óptica. O aluno 7 considera o conceito de propagação como importante, pois é uma das questões sobre ondas, como se propagam, com qual velocidade e o que acontece na mudança do meio de propagação. Apesar de colocar equações nos conectores, considerou a interdependência dos campos elétrico e magnético. Porém, o conceito de polarização foi relacionado apenas ao campo elétrico. Isso sugere que o aluno inicialmente tem a concepção alternativa de que o campo magnético não é polarizado. Note-se que o conector contorna parte do mapa, passando pelo campo magnético, e chegando ao de campo elétrico. A partir do MC1(7), pode-se dizer que o aluno relaciona os conceitos considerando as equações que existem e os interliga. Além dos conceitos de campo elétrico e magnético, também faz esse tipo de raciocínio para os conceitos de frequência e de período, através do conector denominado “inverso”, assim como nas relações entre comprimento de onda – frequência e comprimento de onda-luz visível.

Mapa conceitual do aluno 8:

O mapa conceitual do aluno 8, MC1(8), tem como conceito central “onda luminosa” e também utiliza equações para representar as conexões entre os conceitos. Isso demonstra o quanto os alunos têm dificuldade em identificar uma palavra para nomear o conector e representar o significado da relação entre os conceitos. Apesar de reconhecer os tipos de interferência e suas relações com as fases das ondas, não fez relação imediata entre

interferência e filmes finos, que apenas foi relacionado, corretamente, aos conceitos de refração e reflexão. O aluno 8 não compreendeu o conceito de coerência, pois em sua explicação relaciona onda luminosa com coerência pelo conector “mesma fonte”, havia apenas considerado que pode haver coerência entre duas ondas, ou seja, coerência temporal se a diferença de fase entre essas duas ondas é uma constante no tempo. Mas houve a dificuldade em identificar o caso de apenas uma fonte de luz coerente, por exemplo, o LASER. Outra questão de discussão é o conceito de difração, apresentado no mapa como apenas contorno de obstáculos e sem nenhuma outra relação. Entretanto, o aluno identificou a possibilidade de inversão de fase, quando ocorre a reflexão. O aluno também apresentou as relações do conceito de interferência com os de comprimento de onda, frequência e fase, mas sob forma de fluxograma, indicando que, em geral, quando ocorre a interferência, a onda resultante pode ter a frequência, o comprimento de onda e a fase modificada, além da amplitude, conceito que o aluno não havia apresentado.

O mapa MC2(8) foi elaborado enfocando os conceitos de onda eletromagnética e de campos elétrico e magnético. O aluno 8 traçou esse mapa no final do semestre, já sem tempo para novas discussões, e, da mesma forma que o aluno 4, apresentou os conceitos da Relatividade. Observando esse mapa, pode-se verificar que o aluno faz a relação explícita e adequada entre os campos elétrico e magnético, o que em outros mapas foi necessário chamar a atenção para essa relação importante do eletromagnetismo. Porém, apresentou o conceito de polarização com seus tipos, sem conectá-lo aos conceitos de campo. Isso pode representar que o aluno, apesar de reconhecer o efeito com seus tipos, não atribui valor na relação com o campo elétrico, e nenhuma ao de campo magnético. Também pode ser observado que na base desse mapa conceitual, o aluno apresenta os teoremas e as leis, com nomes e não conceitos dentro das figuras do mapa, distanciando-se dos conceitos da Óptica. Isso pode indicar que o aluno, ao abordar o conceito de onda eletromagnética,

campos elétrico e magnético, atribui relação apenas ao Eletromagnetismo sem relação com a Óptica, por isso o conceito de luz visível aparece isolado junto com o de polarização.

Mapa conceitual do aluno 9:

Nesse mapa conceitual, MC1(9), o aluno 9 faz uma apresentação bem ampla, partindo do conceito de Óptica como central e o diferencia em Óptica Geométrica e Física. Demonstra clareza nessa distinção ao colocar os conectores como “feixe de luz”, para a Óptica Geométrica e “luz como onda”, para a Óptica Física. Entretanto, há dificuldade com relação a diferença de fase para interferência destrutiva, considerando, equivocadamente, uma diferença de fase de $\pi/2$ para haver interferência destrutiva. O conceito de difração é relacionado adequadamente pelo conector que indica a compreensão do aluno, de que a tal efeito não é apenas o contorno de bordas, mas ocorre quando atravessa fendas. O conceito de coerência também é abordado, e é relacionado ao de figura de difração, indicando que o aluno compreende que tal figura só pode ser visualizada se houver se a fonte for coerente. No MC2(9), o conceito de Óptica já aparece como um ramo do eletromagnetismo e o aluno apresenta os conceitos de campo elétrico e magnético e de polarização (linear). Apesar de atentar para a relação entre os conceitos de campo, não há relações com polarização, não há referência ao conceito de luz visível, o que leva a crer que o aluno tem dificuldade em atribuir significados entre conceitos da Óptica e do Eletromagnetismo, este último isolado no lado esquerdo do mapa. Possivelmente, esse mapa pode representar a tentativa do aluno em conceber satisfatoriamente a relação entre duas áreas que historicamente eram consideradas distintas.

Mapa conceitual dos alunos 10, 11 e 12:

Esse mapa conceitual foi traçado pelos alunos destacando a luz, como onda eletromagnética, e o efeito de interferência. Os alunos apresentam adequadamente as relações da fase da onda para cada tipo de interferência (destrutiva e construtiva), mas além disso, consideram a interferência em filmes finos, destacando corretamente a possibilidade de mudança de fase na reflexão dependendo do índice de refração. O conector entre os conceitos de interferência e coerência indica que os alunos compreendem que deve haver tanto coerência espacial como temporal para a visualização das franjas de interferência, por isso adicionaram esses dois últimos como tipos de coerência.

Mapa conceitual do aluno 13:

O MC1(13) foi elaborado como um fluxograma, mas o aluno reuniu conceitos como onda luminosa, difração e interferência, subjacentes ao de Óptica Física, conceito central. As relações apresentadas entre os conceitos de coerência (como fontes coerentes), interferência e difração, demonstra que o aluno tem compreensão acerca da necessidade de haver coerência das ondas para que se perceba as figuras de difração ou interferência em um anteparo, por exemplo. Na relação entre difração e onda luminosa o aluno demonstra que sua concepção sobre esse efeito não é limitada ao caso de contorno de bordas, indicado pelo conector “fenda ou borda”. No MC2(13) o aluno apresenta os conceitos comumente estudados na Óptica Geométrica. Esse mapa, apesar de não fazer parte da proposta de trabalho (estudar conceitos da Óptica Física), representa a dedicação e a satisfação do aluno em estudar os conceitos com o mapa conceitual. Já no MC3(13), o estudante enfatiza o caráter vetorial e eletromagnético da luz, partindo do conceito central “Eletromagnetismo”, relacionando os conceitos de campo elétrico e magnético, onda eletromagnética, incluindo a Óptica, como ramo do Eletromagnetismo, quando relaciona o

conceito de “onda luminosa”. Nesse mapa também surge a questão sobre a relação entre os conceitos de polarização e de campos, sua justificativa é de que apresentou o comentário sobre a oscilação do campo em uma única direção. Apesar disso, a aluno demonstra preocupação em detalhar o conceito de polarização linear, pois também relaciona o conceito de polarizador (filtro) com o de linhas de absorção, sugerindo uma forma de polarizar uma onda eletromagnética.

Mapa conceitual do aluno 14:

O mapa conceitual do aluno 14, MC1(14), tem como conceitos-chave o de luz e onda eletromagnética. Os conceitos imediatamente subjacentes são os de campos elétrico e magnético, polarização e interferência. Novamente, não há relação inicial entre o conceito de polarização e de campo magnético. O conceito de difração não é abordado no mapa por que ainda não havia sido estudado na disciplina. Outro conceito que não foi apresentado na versão inicial do mapa foi o de coerência, indicando que o aluno não compreendeu claramente a forte relação entre esse conceito e a interferência, motivo para discussões em sala de aula.

Mapa conceitual dos alunos 15 e 16:

Nesse mapa conceitual, os alunos apresentam como conceitos centrais os de campos elétrico e magnético, formando o campo eletromagnético, e onda eletromagnética. Explicaram que “ $q=0$ ”, apresentado logo acima de onda eletromagnética, serve para indicar a propagação da onda no vácuo e que, nesse caso, os campos sempre são perpendiculares à direção de propagação. Isso demonstra que os alunos compreendem adequadamente o comportamento dos campos no espaço livre. Nesse caso, há a relação entre polarização e os campos, indicando que os alunos consideraram corretamente a polarização do campo

magnético. Além disso, apresentaram o conceito de ângulo de Brewster também relacionado com a polarização, demonstrando que pode haver um grau de polarização da onda eletromagnética.

No mapa conceitual MC2(15;16), os alunos 15 e 16 mantiveram a estrutura conceitual muito próxima do mapa MC1(15;16), mas adicionaram os conceitos de interferência (destrutiva e construtiva). Apesar de terem indicado o experimento de Young para a visualização das franjas de interferência, não apresentaram explicitamente o conceito de coerência. Isso representa que através do mapa conceitual foi possível identificar a principal dificuldade desses estudantes. Durante a discussão sobre esse mapa conceitual, foi possível constatar que os alunos realmente permaneciam com dificuldade em compreender o conceito de coerência (temporal e espacial).

Mapa conceitual do aluno 17:

O mapa conceitual desse aluno foi traçado para os efeitos de interferência e difração, tornando-os, portanto, os conceitos-chave desse mapa. As dificuldades desse aluno que o mapa salientou, referem-se ao conceito de coerência e de difração. Não havia considerado inicialmente a relação entre interferência e coerência, e descreveu a difração como um efeito que ocorre apenas em casos em que a abertura é da ordem do comprimento de onda. Entretanto, apresentou a interferência em filmes finos de forma adequada, destacando que a espessura do filme deve ser da ordem do comprimento de onda.

Mapa conceitual do aluno 18:

Esse mapa conceitual também foi elaborado para estudar os conceitos de interferência e difração. Diferentemente do anterior, o conceito de coerência já aparece entre os outros dois. O aluno demonstra compreender a necessidade de fontes coerentes

para a visualização das figuras de interferência. Isso é evidenciado nas relações com interferência destrutiva, construtiva com o “experimento de Young”. Além disso, também aborda a interferência em filmes finos, através do conector “pode acontecer em”, explicando as relações corretamente. Sobre o conceito de difração, o aluno 18 demonstra compreender esse efeito de forma ampla, pois apresenta o efeito para redes de difração, exemplificando com a difração de raios x e lei de Bragg. Além disso, considera a difração em abertura circular, relacionando com o “critério de Rayleigh”.

Mapa conceitual do aluno 19:

O aluno 19 foi o que teve a menor participação. Apenas entregou um mapa conceitual e não estava presente nas aulas. Não participou de nenhuma das discussões sobre os mapas. O MC1(19) foi inserido durante as discussões com outros alunos, a fim de obter as opiniões em relação aos conceitos que foram relacionados. É um mapa conceitual pouco expressivo, sugerindo a pouca compreensão desse aluno, que, devido a sua ausência, não pode ser reforçada através da exploração mais profunda desses conceitos com a utilização do mapa conceitual. O MC1(19) tem a hierarquização vertical para os conceitos, onde os conceitos mais importantes estão dispostos no seu topo. São os conceitos de campo elétrico e magnético, relacionados pelas equações de Maxwell. Isso indica que o aluno compreende a interdependência desses dois campos. Nesse mapa também não há relação entre polarização e o conceito de campo elétrico e campo magnético. A inclusão do conceito de polarização apenas representa que o estudante reconhece que a luz pode ser polarizada, quando relaciona polarização e onda de luz. O conceito de intensidade aparece na base do mapa, apenas relacionado ao vetor de Poynting. Nesse caso, a falta de conexões entre os conceitos apresentados e/ou a inclusão de outros conceitos é resultado de o aluno não participar ativamente da elaboração e discussão do mapa conceitual, indicando, nesse

estágio do aprendizado, quais conceitos o aluno lembra quando considera a luz como onda eletromagnética.

Mapa conceitual do aluno 20:

O mapa conceitual elaborado por esse aluno apresenta como conceito central Óptica Física. Os conceitos que apresenta a seguir enfatizam o estudo da luz como onda eletromagnética, cujos conceitos de magnetismo e eletricidade passam a ser relacionados pelas equações de Maxwell. Isso reflete a percepção do aluno quando o tempo é atribuído ao magnetismo e a eletricidade, resultando no eletromagnetismo. O conceito de polarização também é abordado e o aluno apresenta, corretamente, o porquê as ondas eletromagnéticas podem ser polarizadas, quando apresenta o conceito de “transversais”. Esse mapa conceitual foi elaborado considerando a primeira área da disciplina, por esse motivo, conceitos como interferência e difração não foram apresentados.

Mapa conceitual do aluno 21:

Esse mapa conceitual, MC1(21), foi elaborado enfocando o efeito interferência, por isso aparece como conceito central. O aluno faz uma breve apresentação do efeito para dois casos: interferência em filmes finos – o que chamou de película delgada – e como duas fendas. Apesar da simplicidade do mapa, é possível identificar a dificuldade que o aluno tem em relacionar o conceito de fase com o de interferência (destrutiva e construtiva). Isso possibilita abordar esse problema diretamente a fim eliminar suas dúvidas. O mapa MC2(21) foi elaborado sobre ondas eletromagnéticas, que, juntamente com “equações de Maxwell”, parece como conceito-chave. O estudante também apresenta e relaciona adequadamente os conceitos de campo elétrico e magnético, assim como o “vetor de Poynting”, relacionado aos conceitos de onda eletromagnética e intensidade.

Nesse mapa houve uma preocupação maior em identificar os conectores, porém, apesar de também ser um mapa muito simples, carece de mais conexões. Foi traçado considerando os conceitos estudados na primeira área da disciplina e reflete os conceitos mais importantes para o estudante naquele período. Esse mapa conceitual também revela que o aluno pode ter dificuldade na compreensão do conceito de polarização, já que não foi apresentado.

Mapa conceitual do aluno 22:

O mapa conceitual do aluno 22 também foi elaborado no final do semestre, sem tempo para sua apresentação. Porém, esse mapa revela a concepção limitada do aluno sobre a polarização. Esse conceito está relacionado apenas com o campo elétrico, indicando que o aluno também tem a concepção alternativa de que o campo magnético não é polarizável.

Mapa conceitual do aluno 23:

Nesse mapa conceitual, o conceito-chave está no topo do mapa, identificado pelo aluno como “luz”. Logo abaixo, onda eletromagnética, que expressa o estudo do comportamento ondulatório da luz. Os conceitos de interferência e difração não foram incluídos por que ainda não haviam sido abordados. Apesar de os conectores não serem identificados, as relações entre os conceitos dispostos no mapa revelam que o aluno buscou compreender os significados que elas representam. Isso ficou mais evidente durante a apresentação do mapa. Nesse mapa, também se identifica a concepção de campo magnético não-polarizável.

Mapa conceitual dos alunos 24, 25, 26 e 27:

Apesar de ser solicitado que os alunos, se preferissem, trabalhassem com os mapas conceituais em grupos com no máximo três componentes, esse mapa conceitual foi entregue por quatro alunos. Nesse mapa, os alunos identificaram o conceito-chave no seu centro, colocando no lado direito os conceitos abordados na Óptica Física e no esquerdo, os da Óptica geométrica. É interessante destacar que os mapas que continham essas duas abordagens, as apresentava de forma separada, indicando que os estudantes, em geral, não consideram que a Óptica Geométrica está contida na Óptica Física. No lado esquerdo, o conceito de interferência é o único, além da Óptica Física, que se relaciona com o caráter ondulatório da luz. O conceito de difração aparece isolado, conectado apenas ao conceito interferência, que foi o mais analisado, pois os alunos apresentaram corretamente as relações com a fase da onda e os tipos de interferência.

Mapas conceituais dos alunos 18, 28 e 29:

O mapa conceitual elaborado por esses três alunos, MC1 (18;28;29), tem como conceito-chave “onda eletromagnética”, disposto em um retângulo com efeito tridimensional. Verifica-se que para a construção desse mapa, os alunos foram capazes de apresentar e relacionar vários conceitos que caracterizam o Eletromagnetismo, como a “corrente de deslocamento” e “efeito Joule”, a Óptica Física, como a “difração” e o “índice de refração”, este implícito quando sugerem a “mudança de meio”, e a Óptica Geométrica, pela “reflexão” e a “refração”. O conceito de difração é apresentado no mapa como um exemplo de comportamento ondulatório. Os alunos explicaram que “superar obstáculos”, relacionando propagação à difração, não tem sentido restritivo (apenas contornar barreiras). Além disso, fizeram a ligação entre difração e Óptica geométrica, e explicaram

que esse conector tem o objetivo de contrapor a idéia de que a propagação da luz é sempre retilínea, ou seja, destacam o limite de aplicação das proposições da Óptica geométrica.

O mapa conceitual MC2 (28), elaborado apenas pelo aluno 28, parte do conceito “onda eletromagnética”. Nesse mapa, o aluno aborda os conceitos de difração, coerência e interferência, sendo este último implícito nas relações entre “diferença de fase”, “princípio da superposição” e “franjas de interferência”. As conexões que o aluno apresenta, relacionando os conceitos de reflexão, refração e filme fino, indicam como o aluno concebe a incidência de uma onda eletromagnética em um filme delgado, podendo haver modificação na fase da onda. O aluno ainda destaca que a visualização do efeito da difração da luz é facilitada quando o comprimento de onda é da ordem da abertura de uma fenda, isso indica que o efeito ocorre naturalmente, mas sua percepção dependerá das dimensões envolvidas, nesse caso, do tamanho da fenda.

O mapa conceitual MC2 (29), elaborado pelo aluno 29, tem como conceito central “Óptica Física”, localizado na base do mapa. A preocupação do aluno para sua elaboração foi de relacionar os conceitos de interferência, difração e coerência. Porém, analisando a estrutura desse mapa, percebe-se que o estudante tende a expor mais sua compreensão sobre a interferência. Relaciona esse conceito com o de coerência, diferenciando, este último, em temporal e espacial, indicando que o aluno compreende que não basta haver somente coerência temporal para a percepção das franjas de interferência. O aluno também aborda o conceito de “índice de refração”, analisando a possibilidade de defasagem entre as ondas que mudam de meio de propagação. O conceito de Óptica Geométrica é novamente apresentado, destacando-o como uma aproximação possível para a Óptica Física, comprimento de onda muito menor do que as dimensões dos obstáculos, indicado pelo aluno. Apesar de ter adicionado equações no lugar de conceitos ou nomes para os

conectores, o estudante descreveu corretamente as condições em que ocorre a interferência. O comentário apresentado no mapa sobre a difração (capacidade de contornar objetos), tem como objetivo, segundo o aluno, destacar o efeito, não restringi-lo a apenas essa situação.

Mapa conceitual do aluno 30:

O aluno 30 explicou que os conceitos centrais do seu mapa conceitual referem-se a “Eletromagnetismo” e “luz”, como uma onda eletromagnética. Os conceitos de campo elétrico e magnético aparecem no topo do mapa e se relacionam através do eletromagnetismo, assinalando a interdependência desses campos. Logo abaixo de “luz”, o estudante apresenta os efeitos que a luz pode sofrer, apresentado um exemplo para cada um deles. A diferenciação progressiva do conceito de interferência é a elaborada, inclui os tipos de interferência e o conceito de coerência, como “fontes coerentes”. As relações desse conceito com o “experimento de Young” e “franjas de interferência estacionária”, demonstram a concepção científica do aluno para o conceito de coerência. O conceito de polarização aparece relacionado com “planos de vibração” e “polaróides”, juntamente com “Lei de Brewster”, representando o grau de polarização.

Mapa conceitual do aluno 31:

Nesse mapa conceitual, o aluno 31 apresenta “luz” como conceito central, disposto no centro do mapa. A relação entre “campo eletromagnético” e “luz” demonstra que o aluno está considerando o seu comportamento ondulatório e composta pelos campos elétrico e magnético, enfatizado pelo conceito de “onda” colocado no topo do mapa. Os demais conceitos se referem aos efeitos que a luz pode sofrer: interferência, difração, refração e reflexão. Porém, o efeito de “polarização” não está relacionado, isso representa que o aluno, nesse estágio do aprendizado, não considera, de forma imediata, como um dos

efeitos identificáveis. A relação entre "interferência" e "difração" como efeitos geradores da "coerência" das ondas, indica que o estudante não compreende o significado científico para esse último conceito.

Mapa conceitual dos alunos 32 e 33:

No mapa conceitual MC1(32;33), os alunos 32 e 33 apresentam como principais conceitos os de campo elétrico e magnético, no sentido de serem os "geradores" das ondas eletromagnéticas. Também apresentam a combinação desses campos, pelo produto vetorial, originando o "vetor de Poynting", relacionado pelo conector "valor médio" ao conceito "intensidade". No topo do mapa estão as "equações de Maxwell", que representam a condensação de toda a Teoria Eletromagnética Clássica. O conceito de polarização aparece no lado esquerdo do mapa e é relacionado somente ao "campo elétrico". Nessa representação, novamente, surge a concepção de que o campo magnético não é polarizável. Abaixo de "polarização" os alunos identificam algumas formas de se obter uma onda polarizada.

Para o mapa MC2(32;33), os alunos identificam como conceito central "Óptica Física", correspondendo a área científica que trata a luz (conceito imediatamente subjacente) como uma onda. Apresentam os conceitos "interferência" e "difração", que se referem aos efeitos que caracterizam o comportamento ondulatório da luz. É um mapa conceitual que, em relação ao MC1(32;33), os alunos buscaram identificar mais relações de significado entre os conceitos. Os alunos também apresentam o conceito "coerência", identificando e relacionando corretamente os tipos, temporal e espacial, ao de "interferência", que aparece conectado a "franjas de interferência". Isso representa que os estudantes estão considerando que, para a visualização dessas franjas, é necessário que haja tanto coerência espacial como a temporal. Além desses dois mapas conceituais, que

abordam os conceitos da Óptica Física, os alunos 32 e 33 traçaram o mapa MC3(32;33), no qual estão dispostos conceitos sobre a Óptica Geométrica. A proposta de estudo não incluiu esses conceitos, é, portanto, um mapa conceitual elaborado além do sugerido. Isso representa a vivacidade dos alunos em trabalhar com essa ferramenta didática. Apesar de ser um mapa que reúne conceitos da Óptica Geométrica, os alunos relacionaram o conceito “polarização” ao de “reflexão” juntamente com a “Lei de Brewster”, identificando, assim, o grau para a polarização linear.

Mapa conceitual do aluno 34:

O mapa conceitual traçado pelo aluno 34 tem como conceitos-chave “onda eletromagnética”, “campo elétrico” e “campo magnético”, que são relacionados por um conector que possui setas nos dois extremos, representando a interdependência desses campos. Os outros conectores, apesar de não serem nomeados, ora fazem a relação dos demais conceitos com o campo elétrico, ora com o campo magnético, sugerindo considerar que se algum efeito ocorre com o campo elétrico, também afeta o magnético. Assim, o conceito “polarização”, que normalmente aparece relacionado apenas ao campo elétrico, está diretamente conectado ao campo magnético, bem como ao conceito “interferência”. Este último, diferenciado em “construtiva” e “destrutiva”, relaciona-se ao conceito “coerência”. Nessas conexões, dispostas no canto inferior esquerdo do mapa, o aluno demonstra compreender suas relações de significado, pois também apresenta os conceitos “fase” e “franjas de interferência”, que podem ser visualizadas se as ondas forem coerentes. Abaixo de “polarização”, são apresentadas algumas formas de se obter ondas polarizadas, sendo que, no caso da reflexão, o aluno identificou a “lei de Brewster”, referindo-se ao ângulo de Brewster que define um grau de polarização linear.

Após a análise e descrição dos mapas conceituais, foram identificadas três categorias nas quais os mapas conceituais podem ser classificados. A categoria “A”, que reúne os mapas conceituais bem estruturados, ou seja, os que relacionam adequadamente a maioria dos conceitos, inclui duas subcategorias: “A.a”, que se refere aos mapas com conectores identificados, indicando, corretamente, as relações de significado entre os conceitos, e “A.b” que se refere aos mapas que somente são apresentadas alguns conectores identificados. A categoria “B”, que se refere aos mapas com boa estrutura conceitual, mas os conectores não são identificados. E a categoria “C”, que reúne os mapas conceituais pouco elaborados, de estrutura muito simples e pouco representativa. É importante destacar que a identificação dos conectores pode representar qual o significado que o aluno atribui na relação entre os conceitos, podendo, portanto, expressar se a elaboração do mapa conceitual está contribuindo para a aprendizagem significativa desses conceitos. A tabela 16 apresenta essas categorias e a frequência com que aparecem, utilizando a notação definida anteriormente para discriminar os mapas conceituais, que também identifica cada aluno.

Tabela 16: Categorias e subcategorias para as relações de significado apresentadas nos mapas conceituais.

CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS	FREQÜÊNCIAS
A – Mapas conceituais com várias relações de significados e conectores identificados	A.a – Atribuição de significado para todos os conceitos apresentados	MC1(6); MC1(7); MC1(18); MC1(31); MC1(32;33); MC2(32;33); MC3(32;33); MC2(3); MC1(18)
	A.b – Atribuição de significados para alguns conceitos	MC1(1;2); MC2(1;2); MC1(3); MC1(5); MC1(8); MC2(8); MC1(9); MC2(9); MC1(10;11;12); MC1(13); MC2(13); MC3(13); MC1(14); MC1(17)
B – Mapas conceituais com várias relações de significados sem identificação nos conectores		MC1(34); MC1(4); MC1(15;16); MC2(15;16); MC1(22); MC1(23); MC1(18;28;29); MC1(24;25;26;27); MC2(29); MC2(28); MC1(30)
C – Mapas conceituais superficiais		MC1(19); MC1(20); MC1(21); MC2(11); MC2(21)

Fonte: Sistematização do autor com base na análise dos mapas conceituais. Quando a representação MCN significa mapa conceitual N.

O processo de categorização apresentado na tabela 16 para os mapas conceituais é tal que cada mapa aparece em uma única categoria. O mesmo não ocorre para os alunos, o autor do mapa pode ser identificado em mais de uma categoria, expressando o seu nível de participação na elaboração dos mapas conceituais. A partir da tabela 16, foi construído o gráfico abaixo, com o intuito de facilitar a visualização das freqüências em cada categoria:

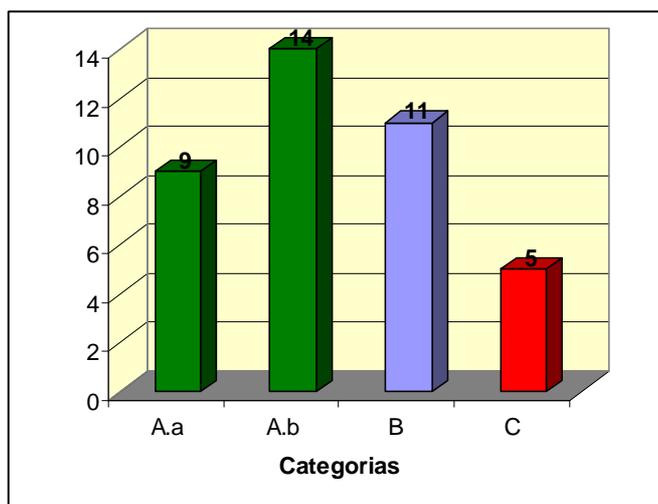


Figura 43: Representação gráfica para as freqüências das categorias

A representação gráfica da figura 41 facilita a visualização da frequência com a qual os mapas conceituais aparecem em cada categoria. A categoria “C”, identificada pela barra vermelha, reúne mapas conceituais pouco expressivos, que não possuem uma boa estrutura conceitual. Na categoria “B”, os mapas são mais elaborados e com vários conectores entre os conceitos, podendo expressar melhor o estudo dos alunos. Para que os mapas conceituais tenham o efeito facilitador da aprendizagem significativa evidenciado, é necessário que os alunos tracem mapas bem elaborados, mas que procurem identificar as relações de significado entre os conceitos, com conectores nomeados. Obviamente, durante a apresentação dos mapas conceituais, conectores não especificados ou outras questões acerca da compreensão conceitual podem ser levantadas. Com base nas descrições e análises dos mapas, juntamente com a frequência de mapas com boa estrutura conceitual, pode-se concluir que a utilização dos mapas conceituais auxiliou os alunos no aprendizado dos conceitos estudados, corroborando o resultado estatístico. Não obstante, as atividades desenvolvidas com os mapas conceituais levaram os alunos a refletir criticamente sobre os conceitos envolvidos, como e porque são relacionados, permitindo, portanto, evidenciar e esclarecer as dificuldades na compreensão dos conteúdos abordados.

No final do semestre, os alunos responderam a um questionário (em anexo no apêndice C) para levantamento de opiniões, com o intuito de complementar a análise qualitativa e conhecer, explicitamente, a apreciação dos estudantes sobre a utilização dos mapas conceituais. As opiniões dos alunos do grupo experimental sobre o uso dos mapas conceituais estão apresentadas no próximo subcapítulo.

5.3.3 – Levantamento de opiniões sobre mapas conceituais

Os próximos parágrafos foram literalmente retirados do questionário distribuído aos alunos no final do semestre, para que pudessem expor suas opiniões e sugestões sobre a utilização dos mapas conceituais.

[...] faz o aluno refletir e organizar seus conhecimentos passados, afinal, muitas vezes após a prova não mais pensamos em organizar as idéias. (aluno 28).

[...] me fez raciocinar sobre a ligação dos fenômenos com as teorias que explicam os mesmos (aluno 15).

[...] esclarece conceitos errados sobre as teorias. (aluno 15).

[...] estimula o estudo da Física de forma menos matemática. (aluno 15).

[...] creio que se fossem usados com mais frequência ajudaria muito a fazer as relações de conceitos físicos com as equações matemáticas. (aluno 15).

[...] acredito que os mapas sejam úteis numa exposição tipo seminário, palestra. (aluno 28).

[...] o que facilitou nos mapas é a organização que é fundamental para os estudos. (aluno 23).

[...] o esclarecimento dos mapas ajuda a aperfeiçoar melhor o entendimento. (aluno 23).

[...] acredito que deveriam estar as equações no mapa. (aluno 23).

[...] pela leitura e a interação com os outros, acabamos entendendo e compreendendo melhor a matéria. (aluno 23).

[...] acho que pode ajudar a entender melhor os conceitos envolvidos, porque faz o aluno raciocinar mais nas ligações entre as matérias. (aluno 29).

[...] organizar o pensamento, saber o que estava relacionado com o que. (aluno 29).

[...] foi uma atividade interessante, que ajudou a melhorar os conceitos da matéria envolvidos, porém deveria ter sido feita durante a aprendizagem e não depois. (aluno 29).

[...] Foi uma boa chance de revisar e conectar os assuntos estudados. (aluno 12).

[...] nos mapas apresentamos problemas e dúvidas que podem ser discutidas em sala de aula. (aluno 12).

[...] creio que os mapas conceituais seriam mais úteis nas séries de formação, ainda no colégio. (aluno 12).

[...] Concordo e apoio o uso dos mapas conceituais. (aluno 17).

[...] Ajuda a fixar conceitos. (aluno 17).

[...] Dá uma visão geral da matéria e a ligação entre os conceitos. (aluno 17).

[...] Permite estudar melhor o conhecimento adquirido e facilita a correlação entre outros fenômenos físicos. (aluno 18).

[...] o mapa conceitual é uma excelente maneira de encarar a Física como uma ciência “formada por conceitos”, ou seja, mostrar que, apesar da matemática ser a ferramenta para demonstrar os fenômenos, é de extrema importância entender o porquê do evento. (aluno 18).

[...] uma vez que os conceitos estão bem compreendidos, a matemática flui mais naturalmente. (aluno 18).

[...] Acho que deve ser encorajado o uso tanto no ensino médio quanto na universidade. (aluno 18).

[...] ao montar um mapa conceitual, organizamos também as nossas idéias. (aluno 32).

[...] alguns conceitos não tão relacionados em sala de aula foram reforçados na realização do mapa. (aluno 33).

[...] Ajudou a tentar compreender a ligação entre certos fenômenos. (aluno 30).

[...] facilitou a aprendizagem conceitual. Em diversos cursos conhecemos bem uma determinada matéria, sua aplicação e com rigor matemático. Mas na verdade desconhecemos o seu aspecto conceitual e na realidade nem sabemos direito o que estamos fazendo. Isso o mapa facilitou. (aluno 16).

[...] com certeza o mapa agrega a questão conceitual nos fatos matemáticos já conhecidos. Auxilia na própria resolução matemática. (aluno 16).

[...] acho que o mapa pode servir como auxílio na prova. A cada área poderia ser entregue um mapa correspondendo a compreensão conceitual do aluno. (aluno 16).

De acordo com as opiniões dos alunos, a utilização dos mapas conceituais é de grande auxílio para a compreensão, atribuição de significados e organização do conteúdo, que, nesse caso, refere-se à Óptica Física. Além disso, apontam que os mapas conceituais poderiam ser mais explorados durante as aulas de Física.

Através da elaboração e discussão dos mapas conceituais foi possível elucidar dúvidas e reforçar o processo de mudança conceitual. Nesse sentido, pode-se afirmar que a técnica de elaboração de mapas conceituais foi uma ferramenta didática que contribuiu para facilitar a aprendizagem significativa dos conceitos abordados nessa disciplina. Poder-se-ia questionar se a diferença das médias dos desempenhos dos alunos pudesse ser atribuída ao material de apoio distribuído (conforme descrito na seção 4.4) e não aos

mapas conceituais. Com o mesmo raciocínio, isso também poderia ser considerado para o livro-texto¹⁶ que foi adotado na disciplina, tanto para os alunos do grupo de comparação como para os do grupo experimental, pois os textos do material de apoio foram elaborados a partir desse livro. Entretanto, deve-se lembrar que um mapa conceitual é traçado a partir de algum conteúdo, identificando e relacionando os conceitos relevantes dispostos hierarquicamente na estrutura do mapa. O construtor do mapa não pode apenas fazer uma “leitura flutuante”, mas atribuir significado a conceitos específicos (relevantes) e nas suas relações. Deve ser capaz de identificar, não qualquer conceito, mas aqueles que são fundamentais na caracterização e representação do conteúdo.

O material de apoio tem a mesma ênfase conceitual do livro, sendo, praticamente, um resumo do mesmo. Dessa forma, a principal diferença entre os grupos experimental e de comparação, durante o estudo da Óptica Física, foi a utilização dos mapas conceituais. A partir das análises quantitativa e qualitativa, foi possível evidenciar o efeito produzido pelos mapas conceituais no processo de aprendizagem dos estudantes.

¹⁶ HALLIDAY, D.; RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4 ed., v. 4. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A problemática do processo ensino-aprendizagem também é caracterizada pelas dificuldades na assimilação de novas informações, possivelmente relacionada à falta de conhecimento prévio adequado. É bem verdade que existem conceitos que são abordados somente em cursos de nível superior, isso representa que falar em concepções alternativas para esses conceitos pode perder o sentido, quando se trata do início da formação, nos níveis fundamental e médio. O aluno chega à universidade sem conhecimento prévio acerca desses conceitos. Entretanto, se durante o aprendizado de novos conteúdos em nível superior o estudante não atribuir significado à nova informação, as dificuldades permanecerem, é possível que novas concepções alternativas surjam ao longo do tempo. No ensino de Física, existem problemas com o domínio do ferramental matemático, mas, além disso, na compreensão dos conteúdos conceituais das teorias científicas. No segundo capítulo dessa dissertação, foram apresentadas algumas concepções alternativas relacionadas a conceitos da Óptica, que corroboram esse problema. Em virtude disso, a escolha dos mapas conceituais como estratégia didática, é devido ao fato de acreditarmos na sua potencialidade no auxílio da aprendizagem, enfatizando o caráter conceitual dos conteúdos de Física.

O objetivo deste trabalho foi de investigar as possíveis dificuldades de aprendizagem por estudantes de graduação em Física em relação aos conceitos da Óptica Física, e analisar utilização dos mapas conceituais como estratégia didática para o

aprendizado desses conceitos. O fato de a investigação ter sido desenvolvida em situação formal de ensino representa uma contribuição importante para os resultados dessa pesquisa, pois a interação com os alunos ocorreu no principal cenário do processo ensino-aprendizagem: a sala de aula. Para a realização da pesquisa nesse ambiente, foi necessário enfrentar uma das principais dificuldades encontradas: inserir atividades extra-disciplinares com o consentimento dos estudantes.

A desistência de alguns alunos e a escolha por não participar da pesquisa, estão relacionadas à dificuldade intrínseca de se desenvolver uma pesquisa em sala de aula, não sendo o professor da disciplina. O processo de inserção das atividades de pesquisa nessa condição envolve persuadir os estudantes em participar de atividades que não são previstas no plano de ensino da disciplina. Mesmo com a possibilidade de haver contribuição favorável no desempenho de cada aluno, com a atribuição de pontos de participação no final do semestre. Além disso, o cronograma de execução da pesquisa teve de sofrer alterações, pois, devido a morosidade de alguns estudantes na elaboração dos mapas conceituais, a discussão dos mapas, assim como o término da pesquisa, tiveram de ser prorrogados. Entretanto, como a investigação foi desenvolvida durante dois semestres consecutivos, possibilitando a interação com um número maior de alunos e uma coleta de dados mais expressiva, o seu resultado não foi prejudicado.

Através da aplicação dos testes inicial e final, foi possível constatar que a média dos desempenhos dos estudantes do grupo experimental foi maior do que a do grupo de comparação, podendo ser atribuído às atividades realizadas em sala de aula com os mapas conceituais. Ademais, através da análise qualitativa a partir dos mapas, foi possível reforçar esse resultado, verificando-se que os alunos trabalharam os significados dos conceitos envolvidos, através da construção dos mapas, que os levou a buscar relações conceituais compatíveis com a concepção científica.

Com o intuito de conhecer a opinião dos alunos sobre a utilização dos mapas conceituais, foi decidido aplicar um questionário para levantamento de opiniões, com a participação dos estudantes do primeiro semestre de 2006. Esse questionário não foi aplicado aos alunos do segundo semestre de 2005, pois foi uma das alterações do cronograma da investigação, objetivando uma qualificação melhor para as observações realizadas. As opiniões dos estudantes apontam que a utilização dos mapas conceituais foi de grande auxílio no estudo dos conceitos científicos abordados, sugerindo, inclusive, que essa técnica deveria ser mais explorada durante às aulas de Física. Essa motivação pode ser representada pelos alunos que traçaram o mapa conceitual além dos tópicos da Óptica Física, apresentando mapas sobre a Óptica Geométrica ou incluindo conceitos sobre a Teoria da Relatividade.

Com base nos resultados dessa pesquisa, constatou-se que os mapas conceituais são instrumentos potencialmente facilitadores da aprendizagem significativa dos conceitos da Óptica Física e podem auxiliar na identificação das dificuldades de aprendizagem dos seus conteúdos.

Apêndice A

Nesta primeira versão do questionário, a questão número 1 é a única que não possui apenas uma resposta correta, tendo como objetivo identificar quais são as representações que o aluno adota para a luz.

Concepções sobre conceitos da Óptica Física – composição inicial

1-Quando você percebe a luz e sua fonte (o Sol, a lâmpada da sala da sua casa, etc.) você a considera como:

- (A) um conjunto de raios, um feixe luminoso, propagando- se em linha reta.
- (B) um conjunto de partículas de luz, os fótons, como pacotes de energia se propagando em várias direções.
- (C) um fluxo contínuo de energia eletromagnética.
- (D) tendo um comportamento dual, podendo apresentar efeitos de caráter ondulatório ou de partícula.

2-A luz se propagando no espaço livre é uma onda eletromagnética:

- (A) mecânica.
- (B) transversal.
- (C) longitudinal.
- (D) bidimensional

3-Quando a luz branca penetra em um meio dispersivo, como um prisma, pode-se observar a sua decomposição em várias cores. Cada cor é caracterizada:

- (A) apenas pelo meio dispersivo em que se propaga.
- (B) apenas pela sensibilidade observador.
- (C) pela amplitude da onda.
- (D) pela frequência de oscilação.

4-Quando duas ondas monocromáticas em fase e com mesmo comprimento de onda interferem, a onda resultante apresenta uma mudança em relação às ondas componentes. Tal mudança se verifica em relação à (ao):

- (A) comprimento de onda.
- (B) período.
- (C) amplitude.
- (D) fase.
- (E) frequência.

5- Se duas ondas luminosas são combinadas, a onda resultante apresenta:

- (A) apenas a amplitude modificada.
- (B) apenas a fase modificada.
- (C) o comprimento de onda, a fase e a amplitude podem ser diferentes das ondas iniciais.
- (D) somente uma alteração no período de oscilação.

6- Considere uma onda luminosa se propagando em um meio no qual o índice de refração é n_1 e que é totalmente refletida ao incidir em uma superfície de um material com índice de refração n_2 . Se a incidência for normal sobre esta superfície, sendo $n_1 < n_2$, há uma variação:

- (A) na sua frequência.
- (B) no seu comprimento de onda.
- (C) na sua velocidade de propagação.
- (D) no sentido de propagação e na sua fase.
- (E) somente no sentido de propagação.

7-Indique qual das asserções abaixo é **Falsa**

- (A) o efeito fotoelétrico é explicado pelo comportamento corpuscular da luz.
- (B) o laser pode ser tratado como um fluxo de partículas.
- (C) a concepção de partículas de luz não implica na quantização da energia eletromagnética.
- (D) a lâmpada de sódio (usada na iluminação pública) possui uma cor amarelada, pois quando os elétrons excitados retornam ao estado de menor energia, emitem fótons na faixa de frequência da luz amarela.

8-Considere uma fonte luminosa que projeta luz sobre as paredes de uma sala e um pilar que intercepta parte desta luz. No caso de a sombra não ser bem definida nas extremidades é devido:

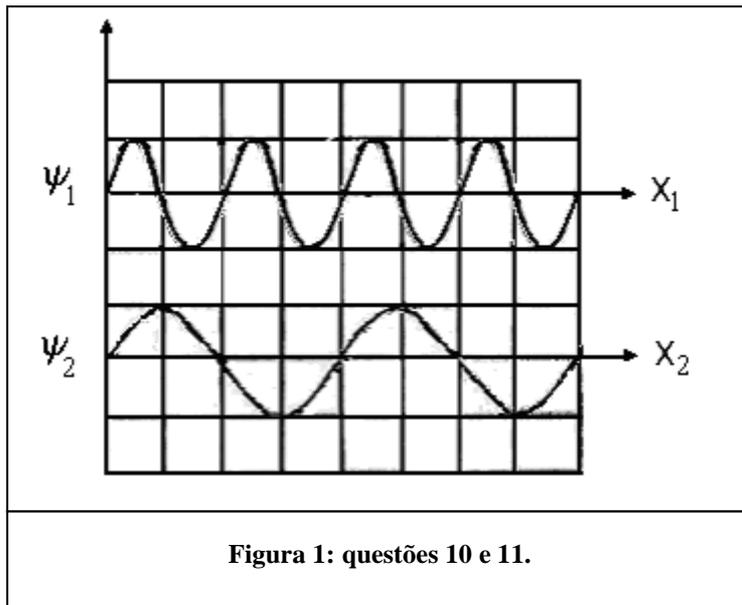
- (A) ao fato de não ser pontual a fonte luminosa.
- (B) ao fato da luz se propagar em linha reta.
- (C) aos fenômenos de interferência da luz depois de tangenciar as bordas do pilar.
- (D) ao fenômeno de difração.

9-A luz visível, as ondas de rádio, os raios X, têm em comum, propagando-se em um meio qualquer:

- (A) a amplitude.
- (B) a frequência.
- (C) a velocidade de propagação.
- (D) o fato de que podem ser tratados como um fluxo de partículas, os fótons.
- (E) o período.

(adaptada de Vianna, 1973)

10- Considere as ondas luminosas ψ_1 e ψ_2 representadas na figura abaixo:



Pode-se afirmar que:

- (A) a onda ψ_1 tem o dobro da amplitude da onda ψ_2 .
- (B) a onda ψ_1 tem a metade da amplitude da onda ψ_2 .
- (C) a onda ψ_1 tem a metade da frequência da onda ψ_2 .
- (D) as ondas ψ_1 e ψ_2 têm a mesma frequência.
- (E) a frequência da onda ψ_1 é o dobro da frequência da onda ψ_2 .

11- Em qual das alternativas está representada a resultante da superposição das duas ondas da figura 1 ?



12- Considere a representação vetorial para os campos elétricos e magnéticos de duas ondas ϕ_1 e ϕ_2 da figura abaixo:

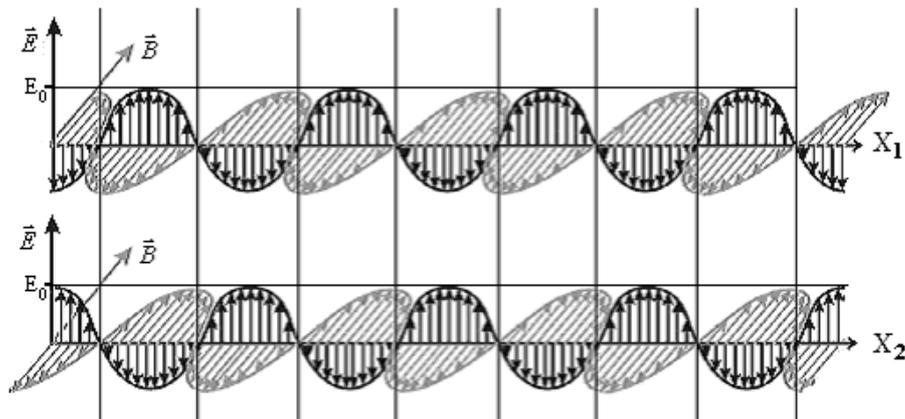
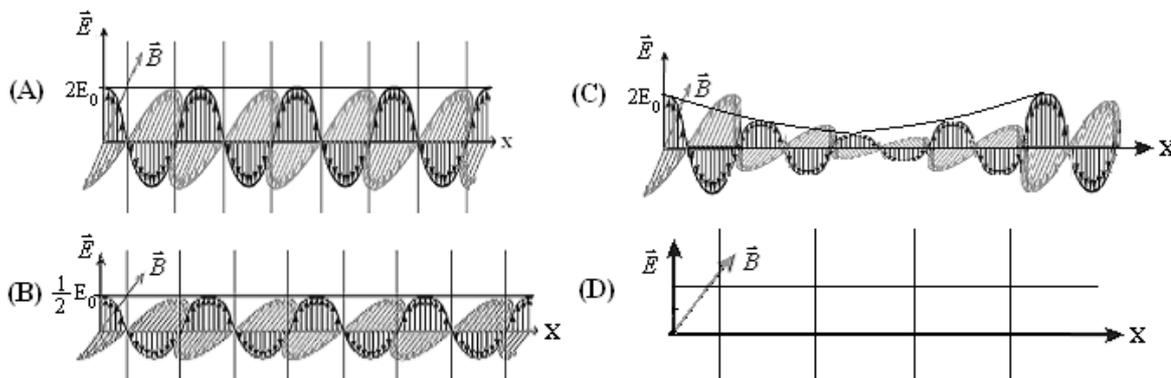


Figura 2: questões 12, 13 e 14.

Pode-se afirmar que as ondas ϕ_1 e ϕ_2 são:

- (A) polarizadas e coerentes entre si.
- (B) polarizadas mas não são coerentes entre si.
- (C) não polarizadas mas coerentes entre si.
- (D) nem polarizadas nem coerentes entre si.

13- Qual das figuras abaixo representa a superposição das duas ondas da figura 2 ?



14- Qual é a diferença de fase entre as duas ondas da figura 2 ?

- (A) $\pi/2$
- (B) 2π
- (C) $3\pi/2$
- (D) $\pi/4$
- (E) π

15- Nas manchas de óleo, nas bolhas de sabão, observa-se o aparecimento de diversas cores, devido a:

- (A) difração da luz.
- (B) polarização das ondas de luz.
- (C) interferência das ondas luminosas.
- (D) serem cores características do material.
- (E) dispersão da luz, como no arco-íris.

16- Considere duas fontes em fase, F_1 e F_2 , de ondas luminosas monocromáticas com a mesma frequência, conforme a figura abaixo:

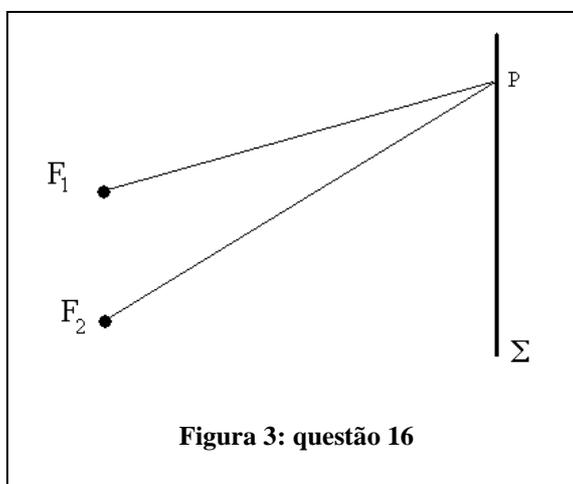


Figura 3: questão 16

Ao incidirem no anteparo Σ podem sofrer interferência destrutiva ou construtiva. Para que ocorra uma interferência totalmente destrutiva no ponto P as duas ondas devem ter uma diferença:

- (A) de fase igual a $\pi/2$.
 (B) de um comprimento de onda.
 (C) de $3/4$ de comprimento de onda
 (D) de fase igual a 2π .
 (E) de fase igual a π .

17- Considere duas fontes de luz polarizada com os campos elétricos dados por

$$\vec{E}_{(1)} = \vec{E}_1 e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_1)}$$

Onde ϕ_1 e ϕ_2 são introduzidos para representar qualquer diferença de fase entre as ondas.

$$\vec{E}_{(2)} = \vec{E}_2 e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_2)}$$

A intensidade I da luz é proporcional ao módulo quadrado do campo elétrico, então:

$$I \propto |\vec{E}|^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}^* = (\vec{E}_{(1)} + \vec{E}_{(2)}) \cdot (\vec{E}_{(1)}^* + \vec{E}_{(2)}^*) = I_1 + I_2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \theta$$

$$\text{onde } \theta = \vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2$$

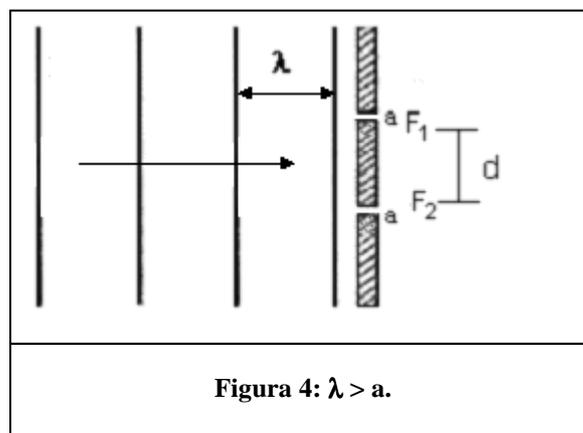
O termo $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \theta$ é chamado *termo de interferência*.

Com base nestas informações, pode-se afirmar que:

- () se a diferença de fase $\phi_1 - \phi_2$ não for uma constante no tempo, as franjas de interferência não podem ser observadas.
 () independentemente da diferença de fase, pode-se observar franjas de interferência.
 () se \vec{E}_1 e \vec{E}_2 forem perpendiculares entre si, as franjas de interferência não podem ser observadas.
 () se $\frac{d}{dt}(\phi_1 - \phi_2) = 0$, as fontes são mutuamente coerentes.

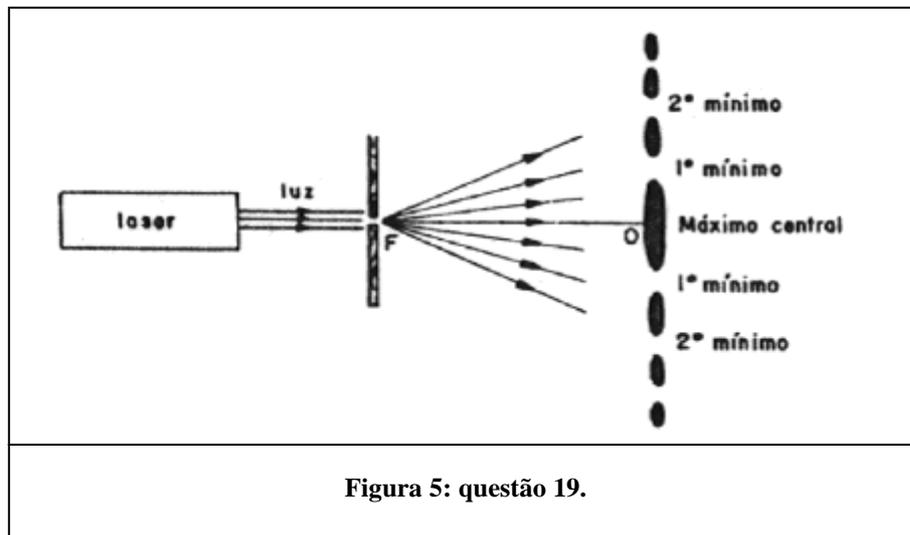
- (A) V - F - F - V
 (B) F - V - F - F
 (C) V - F - V - V
 (D) V - V - F - F
 (E) F - F - V - V

18- Um trem de ondas luminosas planas de comprimento de onda " λ " incide sobre um obstáculo opaco que possui duas fendas F_1 e F_2 com uma distância " d " entre seus centros e com larguras " a ", sendo $a < \lambda$. Nessa situação, indique qual das alternativas contém a afirmação adequada:



- (A) a onda não pode passar pelo obstáculo, pois $\lambda > a$.
- (B) só poderá ser visualizada a figura de difração.
- (C) só poderá ser visualizada a figura de interferência.
- (D) ocorrerão os efeitos de difração e interferência no lado direito do obstáculo.

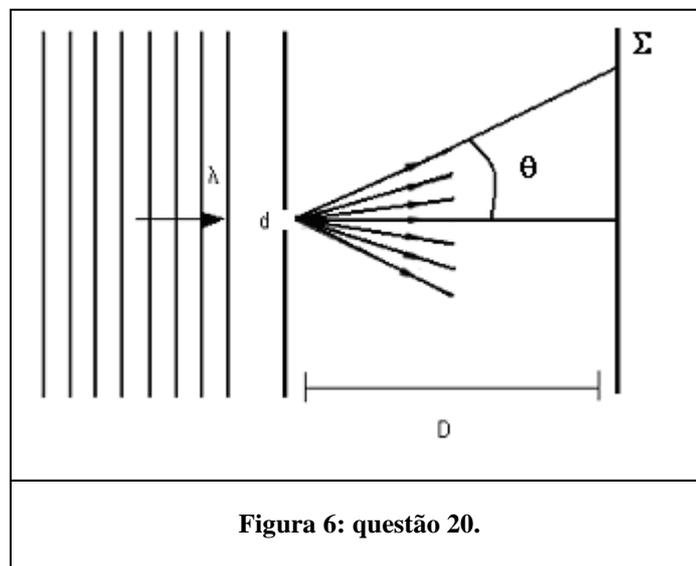
19- Considere a figura abaixo:



À direita do obstáculo se origina uma figura de difração com intensidade não uniforme, com diversos mínimos de intensidade e um máximo de intensidade central em torno da posição “0”. Ao diminuir a largura da fenda, a distância entre um determinado mínimo e a posição “0” e a largura do máximo central..... .

Selecione a alternativa que completa corretamente as lacunas da frase acima.

- (A) aumenta-aumenta.
 - (B) diminui – diminui.
 - (C) diminui – aumenta.
 - (D) permanece constante – diminui.
 - (E) permanece constante - permanece constante.
- 20- A figura abaixo representa uma onda luminosa plana incidindo em um obstáculo opaco com uma fenda de largura “d”. O anteparo Σ está localizado a uma distância D da fenda.

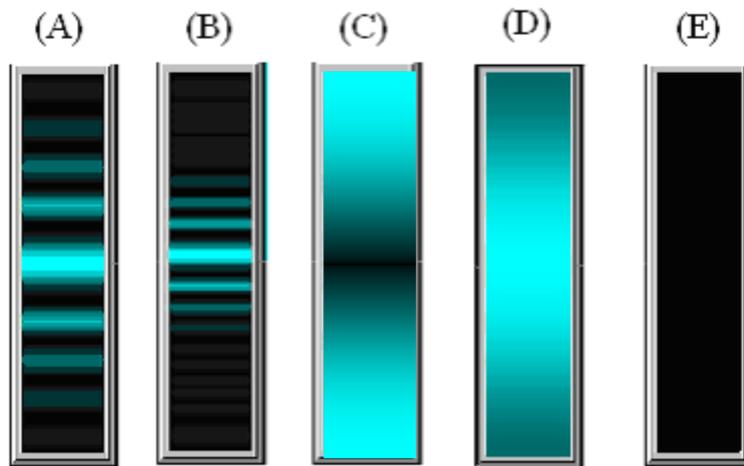


A equação que permite localizar os mínimos de intensidade da luz difratada pela fenda no anteparo é

$$d \operatorname{sen} \theta = m\lambda$$

Onde $m = 1, 2, 3, \dots$, primeiro, segundo, terceiro mínimo, e assim por diante. E θ é o ângulo entre um raio desviado e o raio central.

Se a razão entre λ e d for igual a unidade, que figura de difração você espera observar no anteparo Σ ?



21- A difração da luz é um efeito ondulatório discreto em nosso cotidiano pois:

- (A) sendo o comprimento de onda da luz muito menor do que as dimensões das aberturas (ex. janelas) e obstáculos (ex. edifícios), tal efeito torna-se quase imperceptível no nosso dia-a-dia.
- (B) sendo um efeito somente de contorno de bordas, só a propagação retilínea da luz é que pode ser considerada no nosso cotidiano.
- (C) somente ocorre o efeito da difração se a abertura “a” de um orifício é da ordem do comprimento de onda “ λ ” da luz: $a \approx \lambda$.
- (D) o efeito da difração da luz consiste na mudança de meio de propagação da onda luminosa, o que raramente ocorre no dia-a-dia.

22- A polarização linear da luz consiste em:

- (A) transformar a onda luminosa em onda longitudinal.
- (B) transformar a onda luminosa em luz monocromática.
- (C) fazer a luz se propagar em uma única direção.
- (D) fazer o campo elétrico da luz oscilar em um único plano de vibração.

23- Uma onda somente pode ser polarizada se ela for:

- (A) mecânica.
- (B) longitudinal.
- (C) eletromagnética.
- (D) transversal.
- (E) tridimensional.

24- Analise cada uma das seguintes asserções abaixo e indique verdadeiro ou falso, conforme a alternativa.

- () Ondas mecânicas longitudinais não podem ser polarizadas.
- () O grau de polarização linear da luz refletida na superfície de uma lâmina de vidro plana e lisa depende do ângulo de incidência da luz.
- () Uma onda eletromagnética produzida por uma antena dipolar é linearmente polarizada.

- (A) F – F – V
- (B) F – V – V
- (C) V – F – F
- (D) V – V – V
- (E) F – F – F

25- Qual das alternativas abaixo contém a expressão que representa luz linearmente polarizada ?

$$(A) \vec{B} = (B_y \hat{j} - B_x \hat{i}) \cdot \text{sen}(kz - \omega t + \pi/2)$$

Onde $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ são os vetores unitários que indicam as direções x, y, e Z, respectivamente.

$$(B) \vec{E} = E_x \hat{i} \cos(ky - \omega t) + E_z \hat{k} \cos(ky - \omega t + \pi/2)$$

$$(C) \vec{E} = E_0 \hat{i} \cos(kz - \omega t) + E_0 \hat{j} \text{sen}(kz - \omega t)$$

$$(D) \vec{E} = E_0 (\hat{i} + \hat{j}) [\cos(kz - \omega t) + i \text{sen}(kz - \omega t)]$$

$$(E) \vec{B} = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{j} + B_0 \cos(kx - \omega t + \pi/2) \hat{k}$$

Apêndice B

Concepções sobre conceitos da Óptica Física – Teste inicial

Este material é um instrumento para pesquisa em Ensino de Física, em nível de mestrado, com o objetivo de investigar as concepções sobre os conceitos da Óptica Física. O teste é composto por 20 questões conceituais, que possuem de quatro a cinco alternativas, mas apenas *uma* corresponde à resposta correta.

NOME: _____

TURMA: _____

1-A luz se propagando no espaço livre é uma onda:

- (A) mecânica.
- (B) transversal.
- (C) longitudinal.
- (D) bidimensional.

2-Quando a luz branca penetra em um meio dispersivo, como um prisma, pode-se observar a sua decomposição em várias cores. Cada cor é caracterizada:

- (A) apenas pelo meio dispersivo em que se propaga.
- (B) apenas pela sensibilidade do observador.
- (C) pela amplitude da onda.
- (D) pela frequência de oscilação.

3-Quando duas ondas monocromáticas em fase e com mesmo comprimento de onda interferem, a onda resultante apresenta uma mudança em relação às ondas componentes. Tal mudança se verifica em relação à (ao):

- (A) comprimento de onda.
- (B) período.
- (C) amplitude.
- (D) fase.
- (E) frequência.

4- Se duas ondas luminosas quaisquer são combinadas, a onda resultante apresenta:

- (A) apenas a amplitude modificada.
- (B) apenas a fase modificada.
- (C) o comprimento de onda, a fase e a amplitude podem ser diferentes das ondas iniciais.
- (D) somente uma alteração no período de oscilação e, conseqüentemente, na sua frequência.

5- Considere uma onda luminosa se propagando em um meio no qual o índice de refração é n_1 e que é totalmente refletida ao incidir em uma superfície de um material com índice de refração n_2 . Se a incidência for normal sobre esta superfície, sendo $n_1 < n_2$, há uma variação:

- (A) na sua frequência.
- (B) no seu comprimento de onda.
- (C) na sua velocidade de propagação.
- (D) no sentido de propagação e na sua fase.
- (E) somente no sentido de propagação.

6- Considere uma fonte luminosa que projeta luz sobre as paredes de uma sala e um pilar que intercepta parte desta luz. No caso de a sombra não ser bem definida nas extremidades é devido:

- (A) ao fato de não ser pontual a fonte luminosa.
- (B) ao fato da luz se propagar em linha reta.
- (C) aos fenômenos de interferência da luz depois de tangenciar as bordas do pilar.
- (D) ao fenômeno de difração.

7- Considere a representação vetorial para os campos elétricos e magnéticos de duas ondas ϕ_1 e ϕ_2 da figura abaixo:

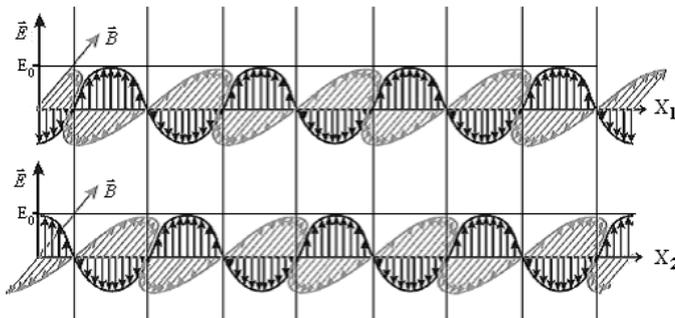
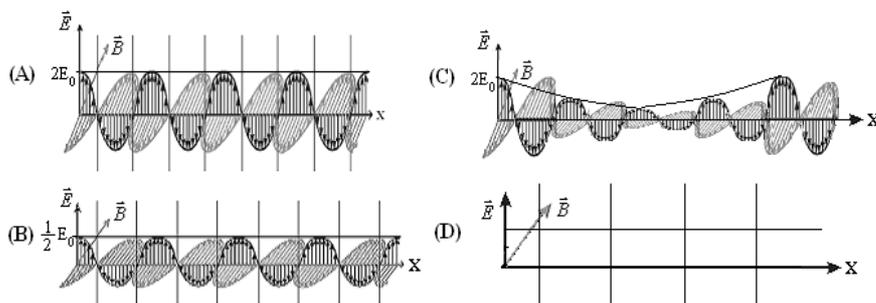


Figura 1: Questões 7, 8 e 9.

Pode-se afirmar que as ondas ϕ_1 e ϕ_2 são:

- (A) polarizadas e coerentes entre si.
- (B) polarizadas mas não são coerentes entre si.
- (C) não polarizadas mas coerentes entre si.
- (D) nem polarizadas nem coerentes entre si.

8- Qual das figuras abaixo representa a superposição das duas ondas da figura 1 ?



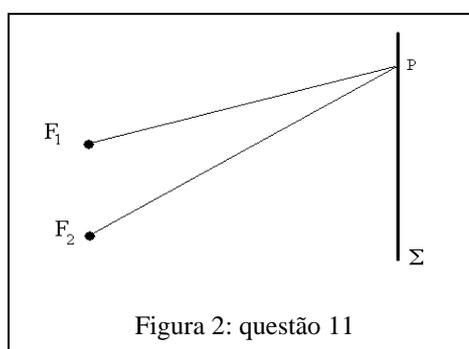
9- Qual é a diferença de fase entre as duas ondas da figura 1 ?

- (A) $\pi/2$
- (B) 2π
- (C) $3\pi/2$
- (D) $\pi/4$
- (E) π

10- Nas manchas de óleo, nas bolhas de sabão, observa-se o aparecimento de diversas cores, devido a:

- (A) difração da luz.
- (B) polarização das ondas de luz.
- (C) interferência das ondas luminosas.
- (D) serem cores características do material.
- (E) dispersão da luz, como no arco-íris.

11- Considere duas fontes em fase, F_1 e F_2 , de ondas luminosas monocromáticas com a mesma frequência, conforme a figura abaixo:



Ao incidirem no anteparo Σ podem sofrer interferência destrutiva ou construtiva. Para que ocorra uma interferência totalmente destrutiva no ponto P as duas ondas devem ter uma diferença:

- (A) de fase igual a $\pi/2$.
- (B) de um comprimento de onda.
- (C) de $3/4$ de comprimento de onda
- (D) de fase igual a 2π .
- (E) de fase igual a π .

12- Considere duas fontes de luz polarizada com os campos elétricos dados por

$$\vec{E}_{(1)} = \vec{E}_1 e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_1)}$$

$$\vec{E}_{(2)} = \vec{E}_2 e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_2)}$$

Onde ϕ_1 e ϕ_2 são introduzidos para representar qualquer diferença de fase entre as ondas.

A intensidade I da luz é proporcional ao módulo quadrado do campo elétrico, então:

$$I \propto |\vec{E}|^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}^* = (\vec{E}_{(1)} + \vec{E}_{(2)}) \cdot (\vec{E}_{(1)}^* + \vec{E}_{(2)}^*) = I_1 + I_2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \theta$$

$$\text{onde } \theta = \vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2$$

O termo $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \theta$ é chamado *termo de interferência*.

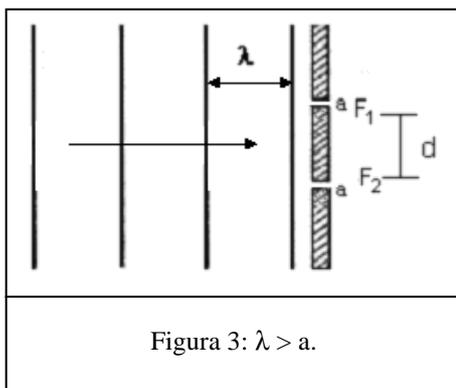
Com base nestas informações, pode-se afirmar que:

- () se a diferença de fase $\phi_1 - \phi_2$ não for uma constante no tempo, as franjas de interferência não podem ser observadas.
- () independentemente da diferença de fase, pode-se observar franjas de interferência.
- () se E_1 e E_2 forem perpendiculares entre si, as franjas de interferência não podem ser observadas.
- () se $\frac{d}{dt}(\phi_1 - \phi_2) = 0$, as fontes são mutuamente coerentes.

- (A) V - F - F - V
 (B) F - V - F - F
 (C) V - F - V - V

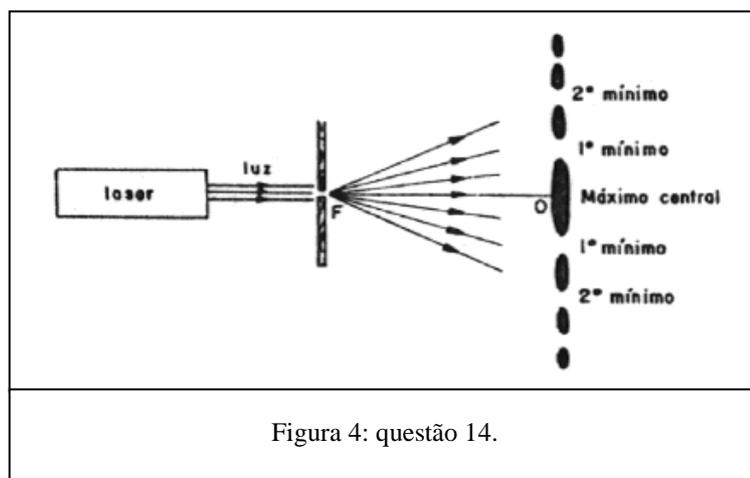
- (D) V - V - F - F
 (E) F - F - V - V

13- Um trem de ondas luminosas planas de comprimento de onda " λ " incide sobre um obstáculo opaco que possui duas fendas F_1 e F_2 com uma distância " d " entre seus centros e com larguras " a ", sendo $a < \lambda$. Nessa situação, indique qual das alternativas contém a afirmação adequada:



- (A) a onda não pode passar pelo obstáculo, pois $\lambda > a$.
- (B) só poderá ser visualizada a figura de difração.
- (C) só poderá ser visualizada a figura de interferência.
- (D) ocorrerão os efeitos de difração e interferência no lado direito do obstáculo.

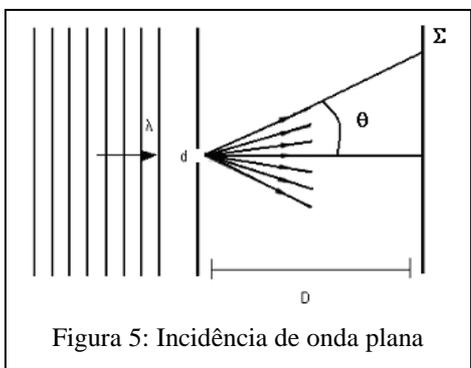
14- Considere a figura abaixo:



À direita do obstáculo se origina uma figura de difração com intensidade não uniforme, com diversos mínimos de intensidade e um máximo de intensidade central em torno da posição “0”. Ao diminuir a largura da fenda, a distância entre um determinado mínimo e a posição “0” e a largura do máximo central..... .
 Selecione a alternativa que completa corretamente as lacunas da frase acima.

- (A) aumenta-aumenta.
- (B) diminui – diminui.
- (C) diminui – aumenta.
- (D) permanece constante – diminui.
- (E) permanece constante - permanece constante.

15- A figura abaixo representa uma onda luminosa plana incidindo em um obstáculo opaco com uma fenda de largura “d”. O anteparo Σ está localizado a uma distância D da fenda.

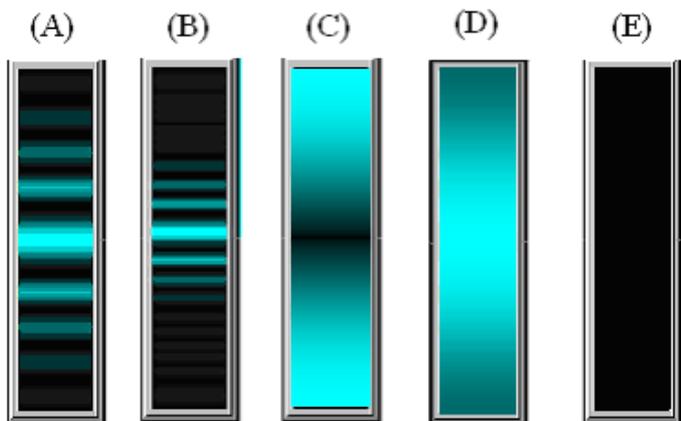


A equação que permite localizar os mínimos de intensidade da luz difratada pela fenda no anteparo é

$$d \sin \theta = m\lambda$$

Onde $m = 1, 2, 3, \dots$, primeiro, segundo, terceiro mínimo, e assim por diante. E θ é o ângulo entre um raio desviado e o raio central.

Se a razão entre λ e d for igual a unidade, que figura de difração você espera observar no anteparo Σ ?



16- A difração da luz é um efeito ondulatório quase imperceptível em nosso cotidiano pois:

- (A) sendo o comprimento de onda da luz muito menor do que as dimensões das aberturas (ex. janelas) e obstáculos (ex. edifícios), tal efeito torna-se quase imperceptível no nosso dia-a-dia.
- (B) sendo um efeito somente de contorno de bordas, só a propagação retilínea da luz é que pode ser considerada no nosso cotidiano.
- (C) somente ocorre o efeito da difração se a abertura “a” de um orifício é da ordem do comprimento de onda “ λ ” da luz: $a \approx \lambda$.
- (D) o efeito da difração da luz consiste na mudança de meio de propagação da onda luminosa, o que raramente ocorre no dia-a-dia.

17- A polarização linear da luz consiste em:

- (A) transformar a onda luminosa em onda longitudinal.
- (B) transformar a onda luminosa em luz monocromática.
- (C) fazer a luz se propagar em uma única direção.
- (D) fazer o campo elétrico da luz oscilar em um único plano de vibração.

18- Uma onda somente pode ser polarizada se ela for:

- (A) mecânica.
- (B) longitudinal.
- (C) eletromagnética.
- (D) transversal.
- (E) tridimensional.

19- Analise cada uma das seguintes asserções abaixo e indique verdadeiro ou falso, conforme a alternativa.

- () Ondas mecânicas longitudinais não podem ser polarizadas.
- () O grau de polarização linear da luz refletida na superfície de uma lâmina de vidro plana e lisa depende do ângulo de incidência da luz.
- () Uma onda eletromagnética produzida por uma antena dipolar é linearmente polarizada.

- (A) F – F – V
- (B) F – V – V
- (C) V – F – F
- (D) V – V – V
- (E) F – F – F

20- Qual das alternativas abaixo contém a expressão que representa luz linearmente polarizada ?

- (A) $\vec{B} = (B_y \hat{j} - B_x \hat{i}) \cdot \text{sen}(kz - \omega t + \pi/2)$
- (B) $\vec{E} = E_x \hat{i} \cos(ky - \omega t) + E_z \hat{k} \cos(ky - \omega t + \pi/2)$
- (C) $\vec{E} = E_0 \hat{i} \cos(kz - \omega t) + E_0 \hat{j} \text{sen}(kz - \omega t)$
- (D) $\vec{E} = E_0 (\hat{i} + \hat{j}) [\cos(kz - \omega t) + i \text{sen}(kz - \omega t)]$
- (E) $\vec{B} = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{j} + B_0 \cos(kx - \omega t + \pi/2) \hat{k}$

Onde $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ são os vetores unitários que indicam as direções x, y, e Z, respectivamente.

RESPOSTAS DO TESTE INICIAL

1	B
2	D
3	C
4	C
5	D
6	D
7	A
8	D
9	E
10	C
11	E
12	C
13	D
14	A
15	D
16	A
17	D
18	D
19	D
20	A

Apêndice C

Concepções sobre conceitos da Óptica Física – Teste final

Este teste é constituído por 20 questões, que se referem aos conceitos da Óptica Física. Cada questão contém de quatro a cinco alternativas, porém, somente uma corresponde à resposta correta. Portanto, escolha apenas uma das alternativas.

NOME: _____

TURMA: _____

1- A polarização linear da luz consiste em:

- (A) transformar a onda luminosa em onda longitudinal.
- (B) transformar a onda luminosa em luz monocromática.
- (C) fazer o campo elétrico da luz oscilar em um único plano de vibração.
- (D) fazer a luz se propagar em uma única direção.

2- Considere a representação vetorial para os campos elétricos e magnéticos de duas ondas ϕ_1 e ϕ_2 da figura abaixo:

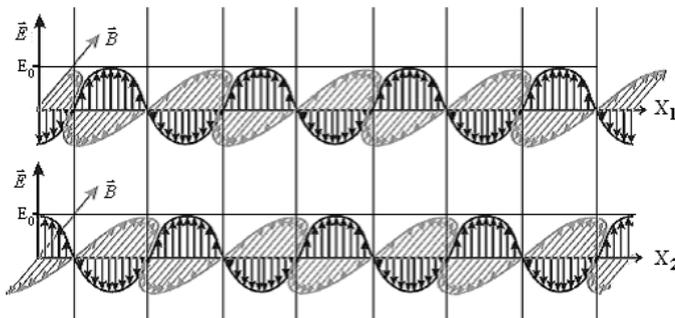


Figura 1: Questões 2, 4 e 5.

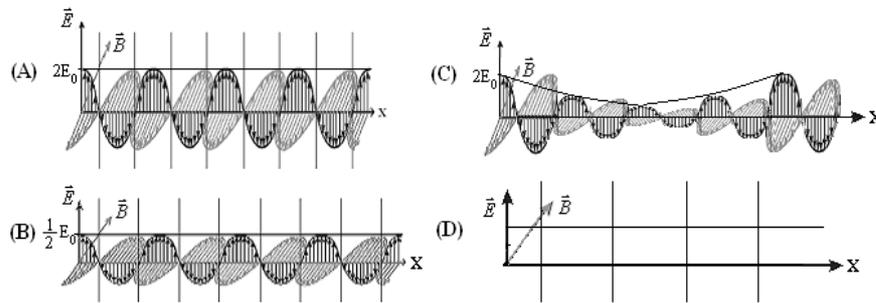
Pode-se afirmar que as ondas ϕ_1 e ϕ_2 são:

- (A) nem polarizadas nem coerentes entre si.
- (B) polarizadas mas não são coerentes entre si.
- (C) não polarizadas mas coerentes entre si.
- (D) polarizadas e coerentes entre si.

3- Uma onda somente pode ser polarizada se ela for:

- (A) mecânica.
- (B) longitudinal.
- (C) eletromagnética.
- (D) tridimensional.
- (E) transversal.

4- Qual das figuras abaixo representa a superposição das duas ondas da figura 1 ?



5- Qual é a diferença de fase entre as duas ondas da figura 1 ?

- (A) $\pi/2$
- (B) π
- (C) $3\pi/2$
- (D) $\pi/4$
- (E) 2π

6- Analise cada uma das seguintes asserções abaixo e indique verdadeiro ou falso, conforme a alternativa.

- () Ondas mecânicas longitudinais não podem ser polarizadas.
- () O grau de polarização linear da luz refletida na superfície de uma lâmina de vidro plana e lisa depende do ângulo de incidência da luz.
- () Uma onda eletromagnética produzida por uma antena dipolar é linearmente polarizada.

- (A) F – F – V
- (B) V – V – V
- (C) V – F – F
- (D) F – V – V
- (E) F – F – F

7- Qual das alternativas abaixo contém a expressão que representa luz linearmente polarizada ?

- (A) $\vec{E} = E_0 \hat{i} \cos(kz - \omega t) + E_0 \hat{j} \sin(kz - \omega t)$
- (B) $\vec{E} = E_x \hat{i} \cos(ky - \omega t) + E_z \hat{k} \cos(ky - \omega t + \pi/2)$
- (C) $\vec{B} = (B_y \hat{j} - B_x \hat{i}) \cdot \sin(kz - \omega t + \pi/2)$
- (D) $\vec{E} = E_0 (\hat{i} + \hat{j}) [\cos(kz - \omega t) + i \sin(kz - \omega t)]$
- (E) $\vec{B} = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{j} + B_0 \cos(kx - \omega t + \pi/2) \hat{k}$

Onde $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ são os vetores unitários que indicam as direções x, y, e z, respectivamente.

8- Considere duas fontes de luz polarizada com os campos elétricos dados por

$$\vec{E}_{(1)} = \vec{E}_1 e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_1)}$$

Onde ϕ_1 e ϕ_2 são introduzidos para representar qualquer diferença de fase entre as ondas.

$$\vec{E}_{(2)} = \vec{E}_2 e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_2)}$$

A intensidade I da luz é proporcional ao módulo quadrado do campo elétrico, então:

$$I \propto |\vec{E}|^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}^* = (\vec{E}_{(1)} + \vec{E}_{(2)}) \cdot (\vec{E}_{(1)}^* + \vec{E}_{(2)}^*) = I_1 + I_2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \theta$$

$$\text{onde } \theta = \vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2$$

O termo $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \theta$ é chamado *termo de interferência*.

Com base nestas informações, pode-se afirmar que:

() se a diferença de fase $\phi_1 - \phi_2$ não for uma constante no tempo, as franjas de interferência não podem ser observadas.

() independentemente da diferença de fase, pode-se observar franjas de interferência.

() se \vec{E}_1 e \vec{E}_2 forem perpendiculares entre si, as franjas de interferência não podem ser observadas.

() se $\frac{d}{dt}(\phi_1 - \phi_2) = 0$, as fontes são mutuamente coerentes.

(A) V – F – F – V

(D) V – V – F – F

(B) F – V – F – F

(E) V – F – V – V

(C) F – F – V – V

9-A luz se propagando no espaço livre é uma onda:

(A) bidimensional.

(B) mecânica.

(C) longitudinal.

(D) transversal.

10-Quando a luz branca penetra em um meio dispersivo, como um prisma, pode-se observar a sua decomposição em várias cores. Cada cor é caracterizada:

(A) apenas pelo meio dispersivo em que se propaga.

(B) apenas pela sensibilidade do observador.

(C) pela frequência de oscilação.

(D) pela amplitude da onda.

11-Quando duas ondas monocromáticas em fase e com mesmo comprimento de onda interferem, a onda resultante apresenta uma mudança em relação às ondas componentes. Tal mudança se verifica em relação à (ao):

(A) comprimento de onda.

(B) período.

(C) fase.

(D) amplitude.

(E) frequência.

12- Se duas ondas luminosas quaisquer são combinadas, a onda resultante apresenta:

- (A) apenas a amplitude modificada.
- (B) somente uma alteração no período de oscilação e, conseqüentemente, na sua frequência.
- (C) apenas a fase modificada.
- (D) o comprimento de onda, a fase e a amplitude podem ser diferentes das ondas iniciais.

13- Considere uma onda luminosa se propagando em um meio no qual o índice de refração é n_1 e que é totalmente refletida ao incidir em uma superfície de um material com índice de refração n_2 . Se a incidência for normal sobre esta superfície, sendo $n_1 < n_2$, há uma variação:

- (A) na sua frequência.
- (B) no sentido de propagação e na sua fase.
- (C) na sua velocidade de propagação.
- (D) no seu comprimento de onda.
- (E) somente no sentido de propagação.

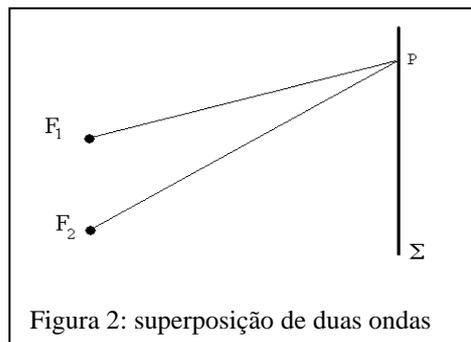
14- Considere uma fonte luminosa que projeta luz sobre as paredes de uma sala e um pilar que intercepta parte desta luz. No caso de a sombra não ser bem definida nas extremidades é devido:

- (A) ao fato de não ser pontual a fonte luminosa.
- (B) ao fato da luz se propagar em linha reta.
- (C) aos fenômenos de interferência da luz depois de tangenciar as bordas do pilar.
- (D) ao fenômeno de difração.

15- Nas manchas de óleo, nas bolhas de sabão, observa-se o aparecimento de diversas cores, devido a:

- (A) difração da luz.
- (B) polarização das ondas de luz.
- (C) dispersão da luz, como no arco-íris.
- (D) serem cores características do material.
- (E) interferência das ondas luminosas.

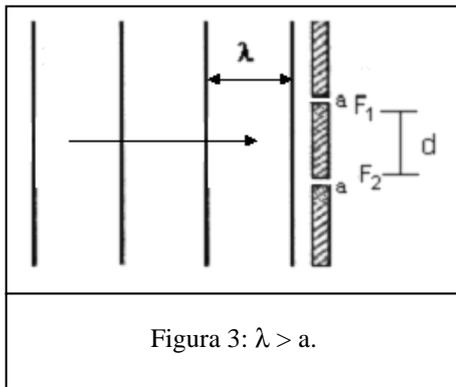
16- Considere duas fontes em fase, F_1 e F_2 , de ondas luminosas monocromáticas com a mesma frequência, conforme a figura abaixo:



Ao incidirem no anteparo Σ podem sofrer interferência destrutiva ou construtiva. Para que ocorra uma interferência totalmente destrutiva no ponto P as duas ondas devem ter uma diferença:

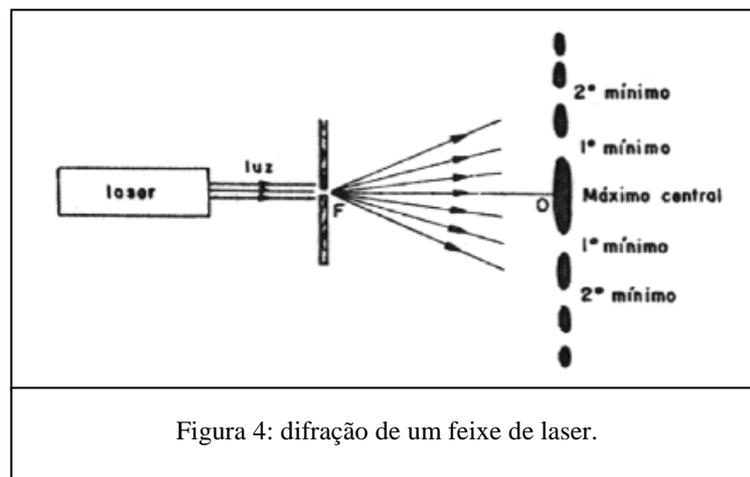
- (A) de fase igual a $\pi/2$.
- (B) de um comprimento de onda.
- (C) de fase igual a π .
- (D) de fase igual a 2π .
- (E) de $3/4$ de comprimento de onda.

17- Um trem de ondas luminosas planas de comprimento de onda " λ " incide sobre um obstáculo opaco que possui duas fendas F_1 e F_2 com uma distância " d " entre seus centros e com larguras " a ", sendo $a < \lambda$. Nessa situação, indique qual das alternativas contém a afirmação adequada:



- (A) a onda não pode passar pelo obstáculo, pois $\lambda > a$.
- (B) só poderá ser visualizada a figura de difração.
- (C) ocorrerão os efeitos de difração e interferência no lado direito do obstáculo.
- (D) só poderá ser visualizada a figura de interferência.

18- Considere a figura abaixo:

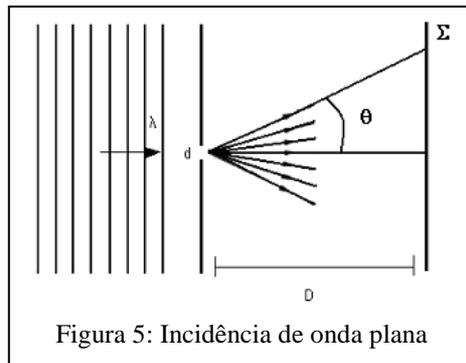


À direita do obstáculo se origina uma figura de difração com intensidade não uniforme, com diversos mínimos de intensidade e um máximo de intensidade central em torno da posição "0". Ao diminuir a largura da fenda, a distância entre um determinado mínimo e a posição "0" e a largura do máximo central.....

Selecione a alternativa que completa corretamente as lacunas da frase acima.

- (A) diminui – aumenta.
- (B) diminui – diminui.
- (C) aumenta-aumenta.
- (D) permanece constante – diminui.
- (E) permanece constante - permanece constante.

19- A figura abaixo representa uma onda luminosa plana incidindo em um obstáculo opaco com uma fenda de largura “d”. O anteparo Σ está localizado a uma distância D da fenda.

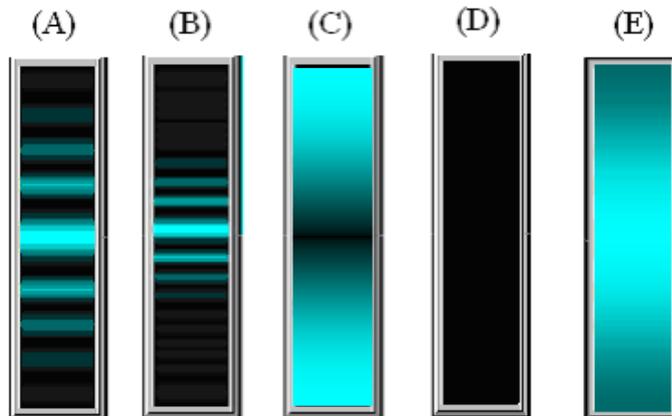


A equação que permite localizar os mínimos de intensidade da luz difratada pela fenda no anteparo é

$$d \sin \theta = m\lambda$$

Onde $m = 1, 2, 3, \dots$, primeiro, segundo, terceiro mínimo, e assim por diante. E θ é o ângulo entre um raio desviado e o raio central.

Se a razão entre λ e d for igual a unidade, que figura de difração você espera observar no anteparo Σ ?



20- A difração da luz é um efeito ondulatório quase imperceptível em nosso cotidiano pois:

- (A) somente ocorre o efeito da difração se a abertura “a” de um orifício é da ordem do comprimento de onda “ λ ” da luz: $a \approx \lambda$.
- (B) sendo um efeito somente de contorno de bordas, só a propagação retilínea da luz é que pode ser considerada no nosso cotidiano.
- (C) sendo o comprimento de onda da luz muito menor do que as dimensões das aberturas (ex. janelas) e obstáculos (ex. edifícios), tal efeito torna-se quase imperceptível no nosso dia-a-dia.
- (D) o efeito da difração da luz consiste na mudança de meio de propagação da onda luminosa, o que raramente ocorre no dia-a-dia.

RESPOSTAS DO TESTE FINAL

1	C
2	D
3	E
4	D
5	B
6	B
7	C
8	E
9	D
10	C
11	D
12	D
13	B
14	D
15	E
16	C
17	C
18	C
19	E
20	C

Apêndice D

Questionário para levantamento de opiniões dos alunos sobre os mapas conceituais

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
MESTRADO EM FÍSICA**

**ESTUDO SOBRE MAPAS CONCEITUAIS APLICADOS À ÓPTICA
FÍSICA**

Voltaire de Oliveira Almeida

DATA ___/___/___

Nome: _____ Turma: _____

QUESTÕES:

1) Em sua opinião, o estudo com os *mapas conceituais* facilitou a aprendizagem dos conteúdos abordados? Por quê?

2) Identifica, nas discussões promovidas em sala de aula com os mapas conceituais, uma maneira de facilitar a aprendizagem dos conteúdos? Explique. ?

3) Para você o uso dos mapas conceituais é uma “estratégia didática” adequada a ser aplicada nas aulas de Física? Por quê?

4) Houve dificuldades em construir o mapa conceitual? _____

4.1) Se houve, qual (is) a apresentou-se (aram-se) como relevante (s)?

5) Em sua opinião, a utilização de mapas conceituais pode facilitar a compreensão da relação entre as equações matemáticas e os conceitos envolvidos? Por quê?

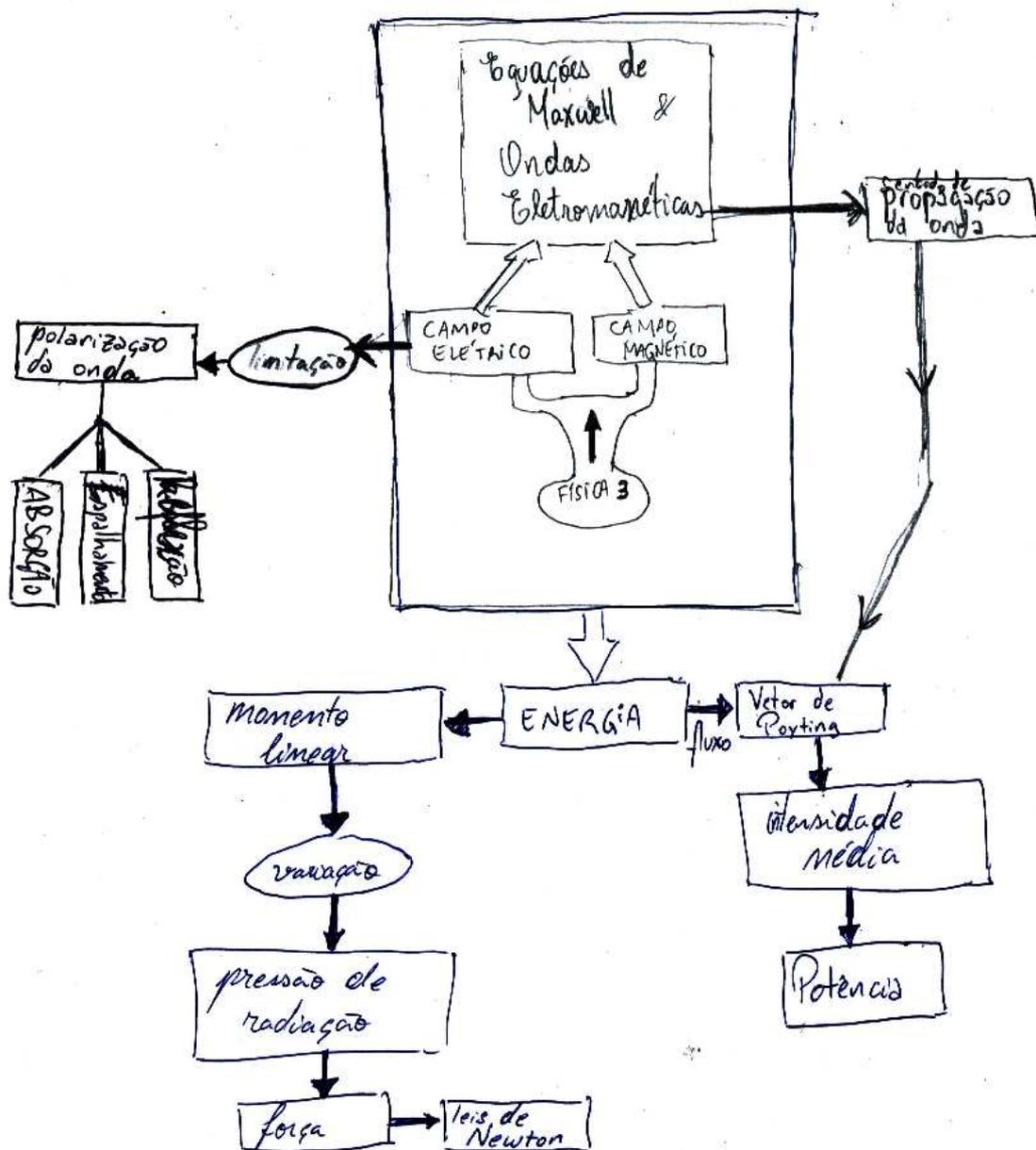
6) Você já conhecia alguma aplicação dos mapas conceituais? _____

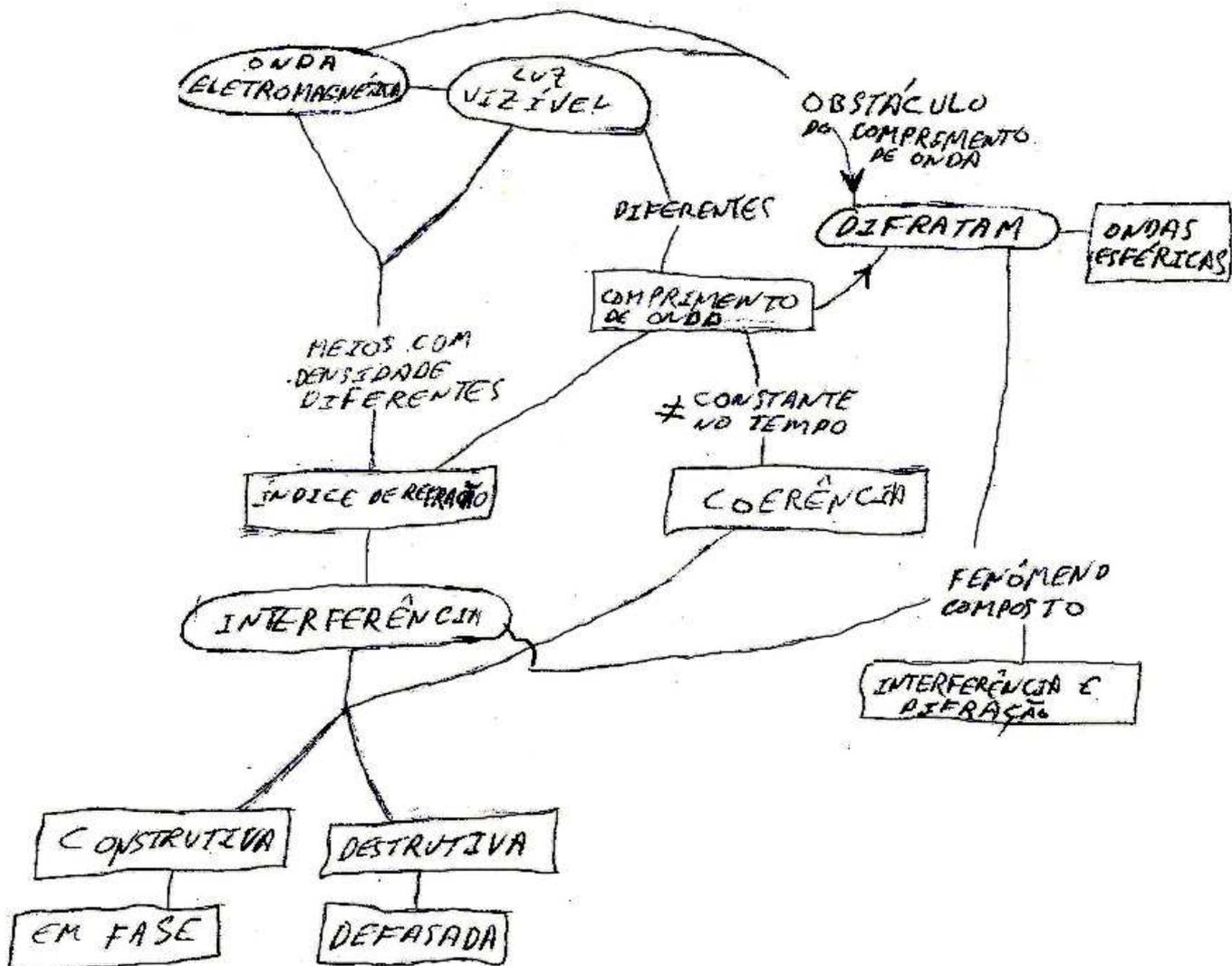
6.1) Se sim, explique como teve contato com a mesma.

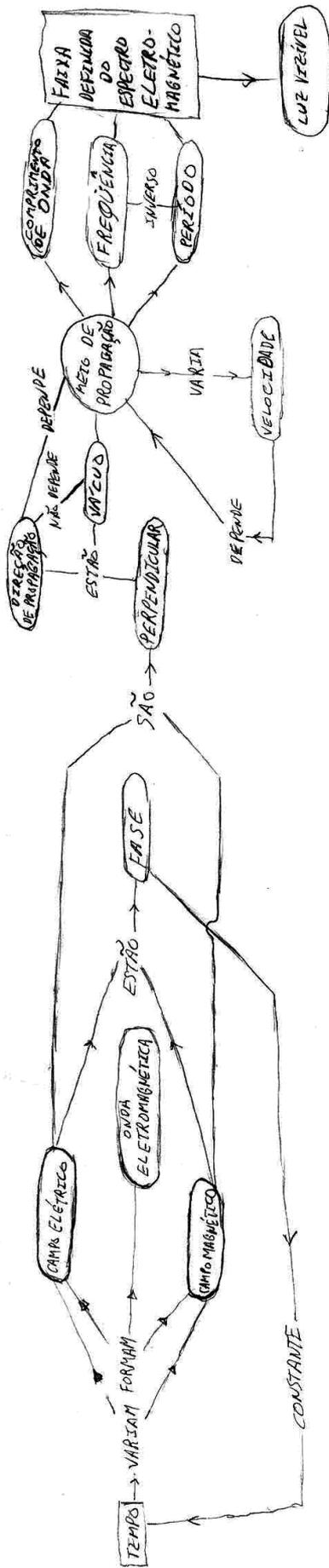
7) De acordo com as atividades desenvolvidas em sala de aula sobre os mapas conceituais, explicita sua opinião/sugestão no que se refere ao seu uso.

Mapas conceituais elaborados pelos alunos

Alunos: 1 e 2 - MC1(1;2)







$F = E_m \text{ sen}(kx - \omega t)$
 $B = E_m \text{ sen}(kx - \omega t)$

$k \rightarrow$ N° DE ONDA

$\omega t \rightarrow$ FREQÜÊNCIA ANGULAR

$E_m, B_m \rightarrow$ AMPLITUDE DOS CAMPOS

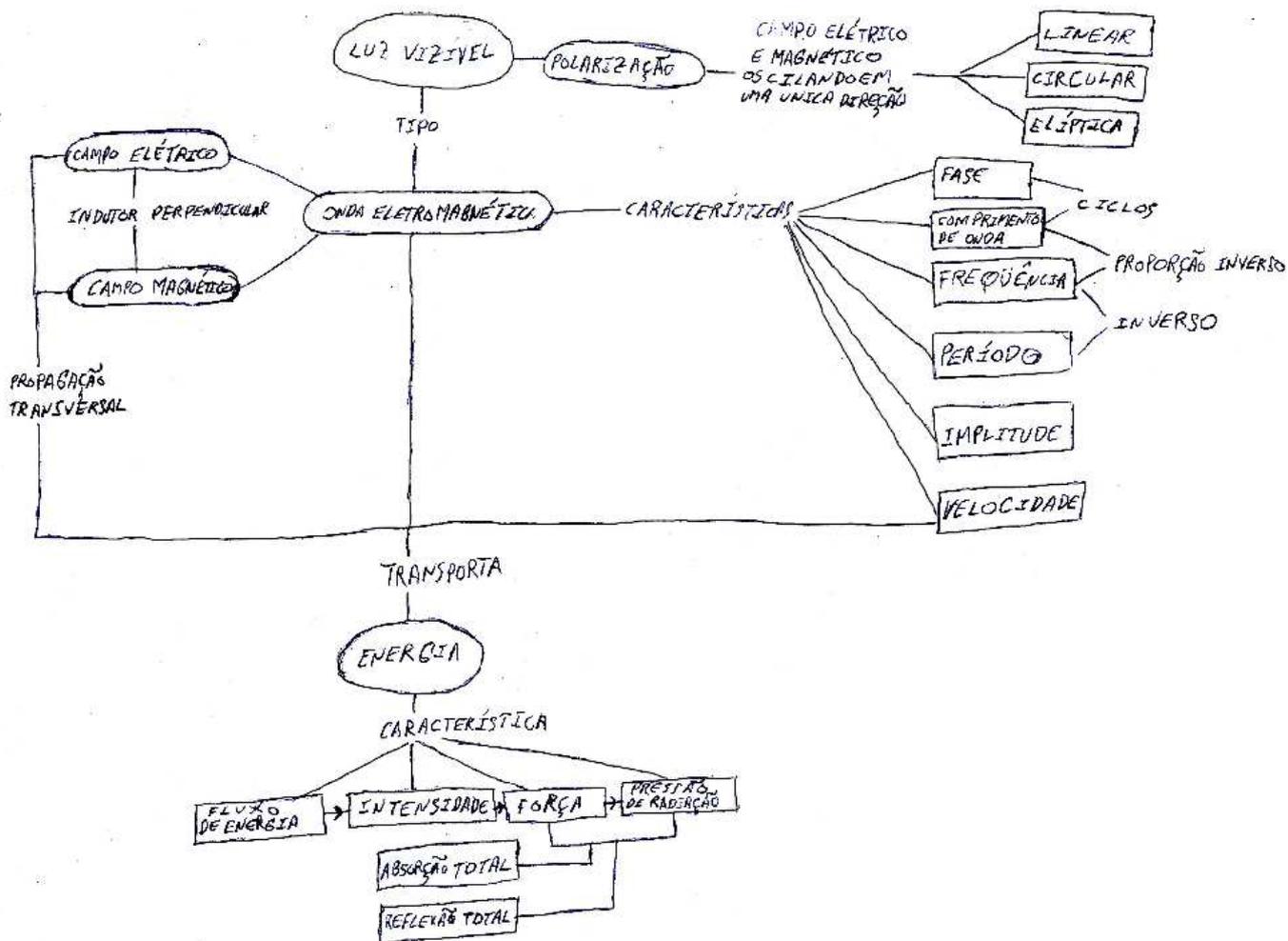
$\omega/k \rightarrow$ VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

$c = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$ → VELOCIDADE DA ONDA

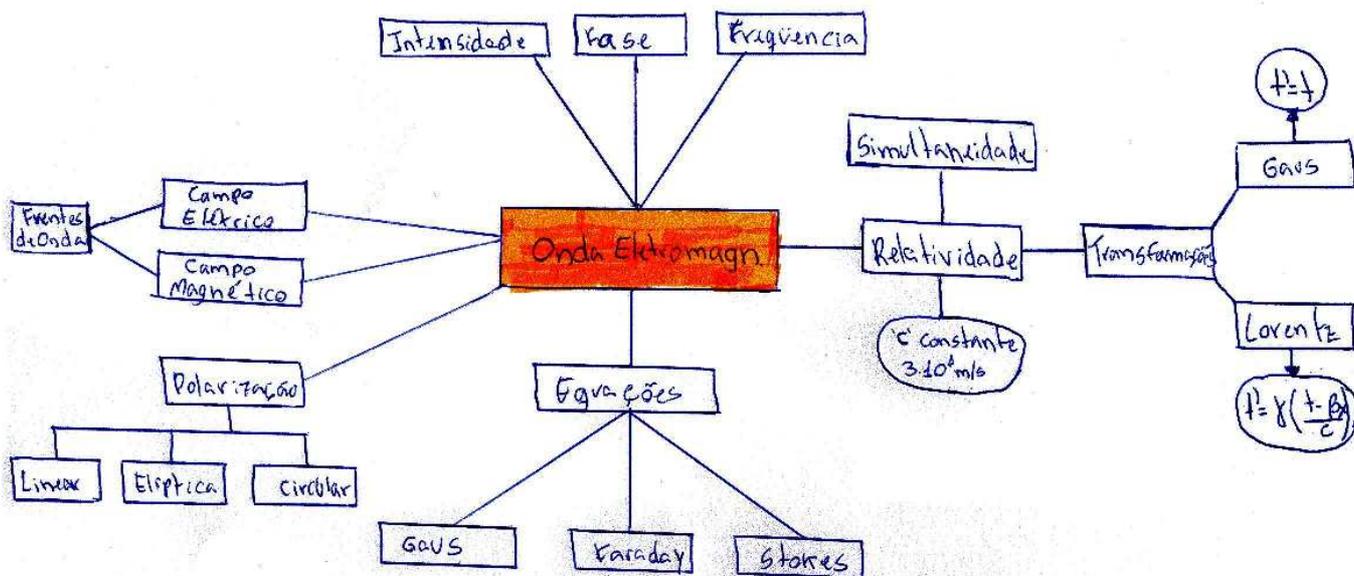
$\frac{E_m}{B_m} = c$ → RAZÃO NAS AMPLITUDES

$\frac{E}{B} = c$ → RAZÃO DOS MÓDULOS

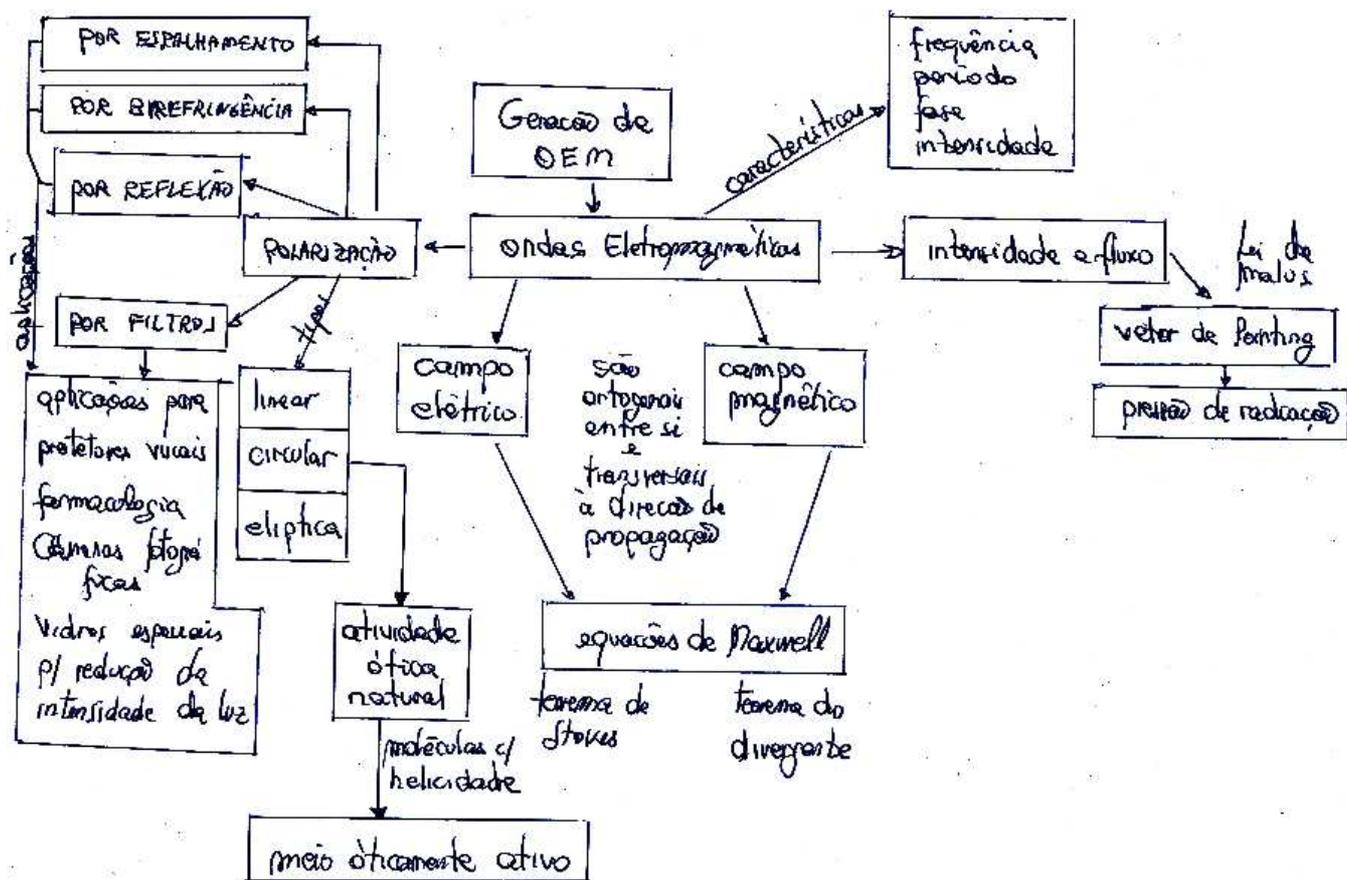
MAPA CONCEITUAL DA DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA



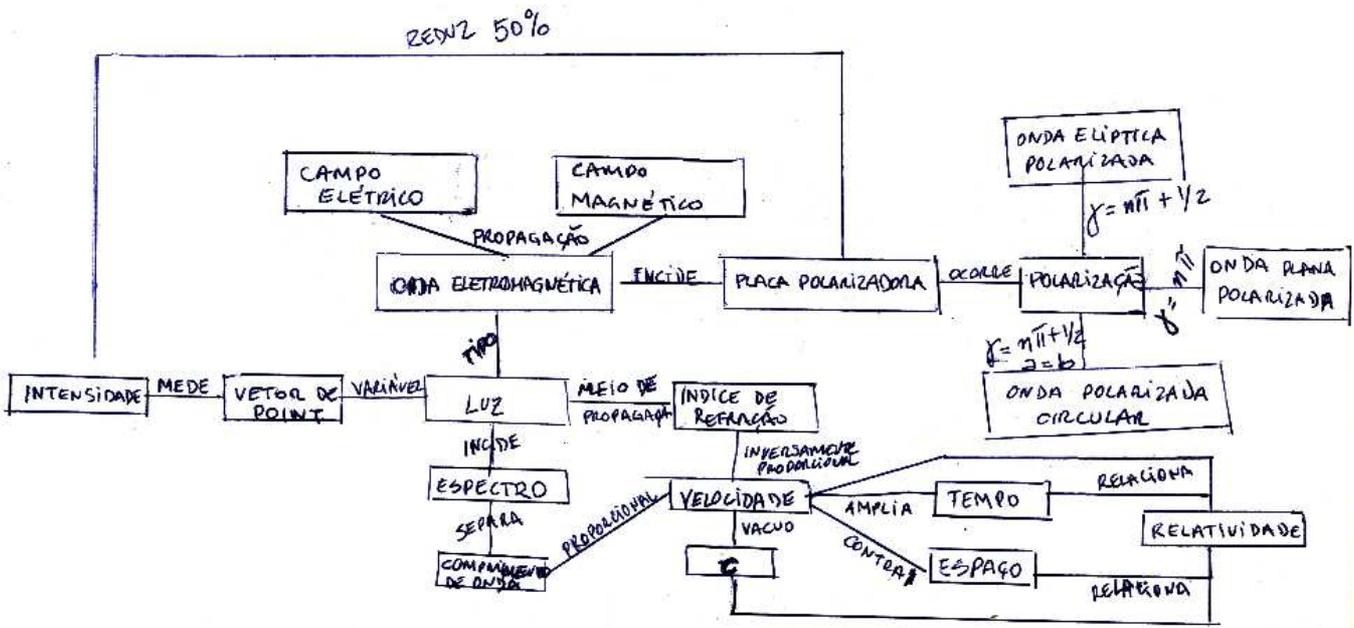
Aluno: 4 – MC1(4)



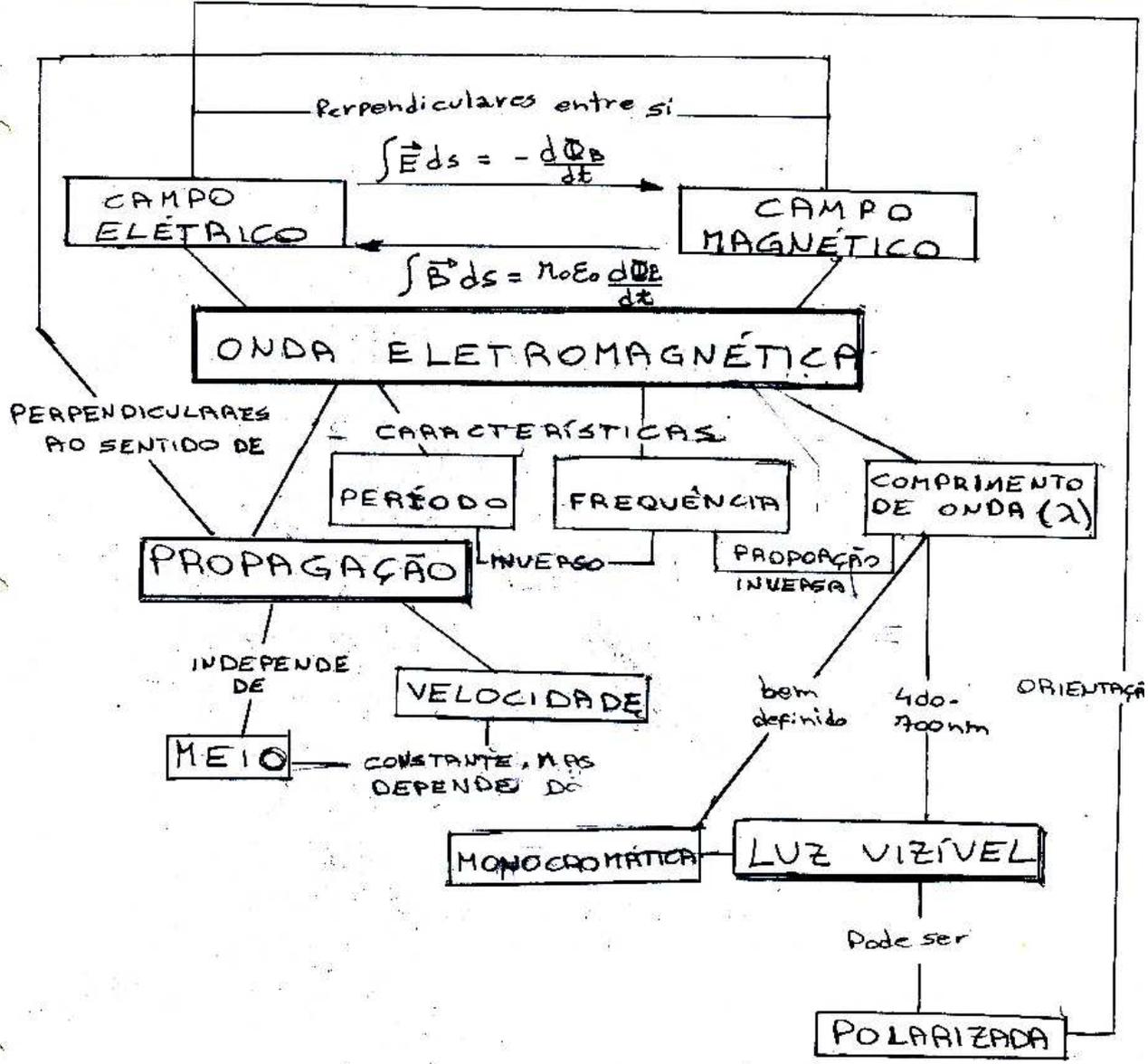
Aluno: 5 – MC1(5)



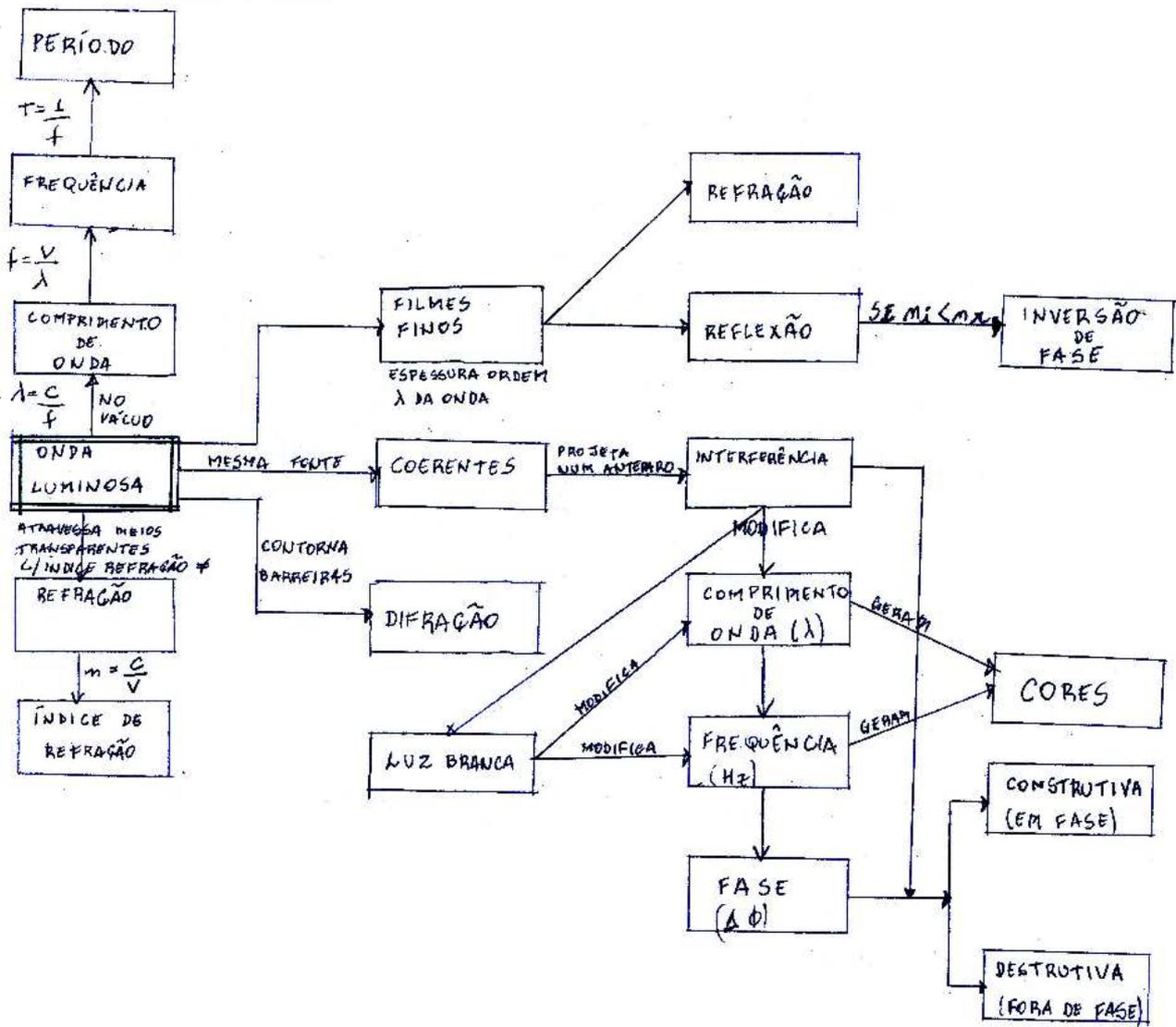
Aluno: 6 – MC1(6)



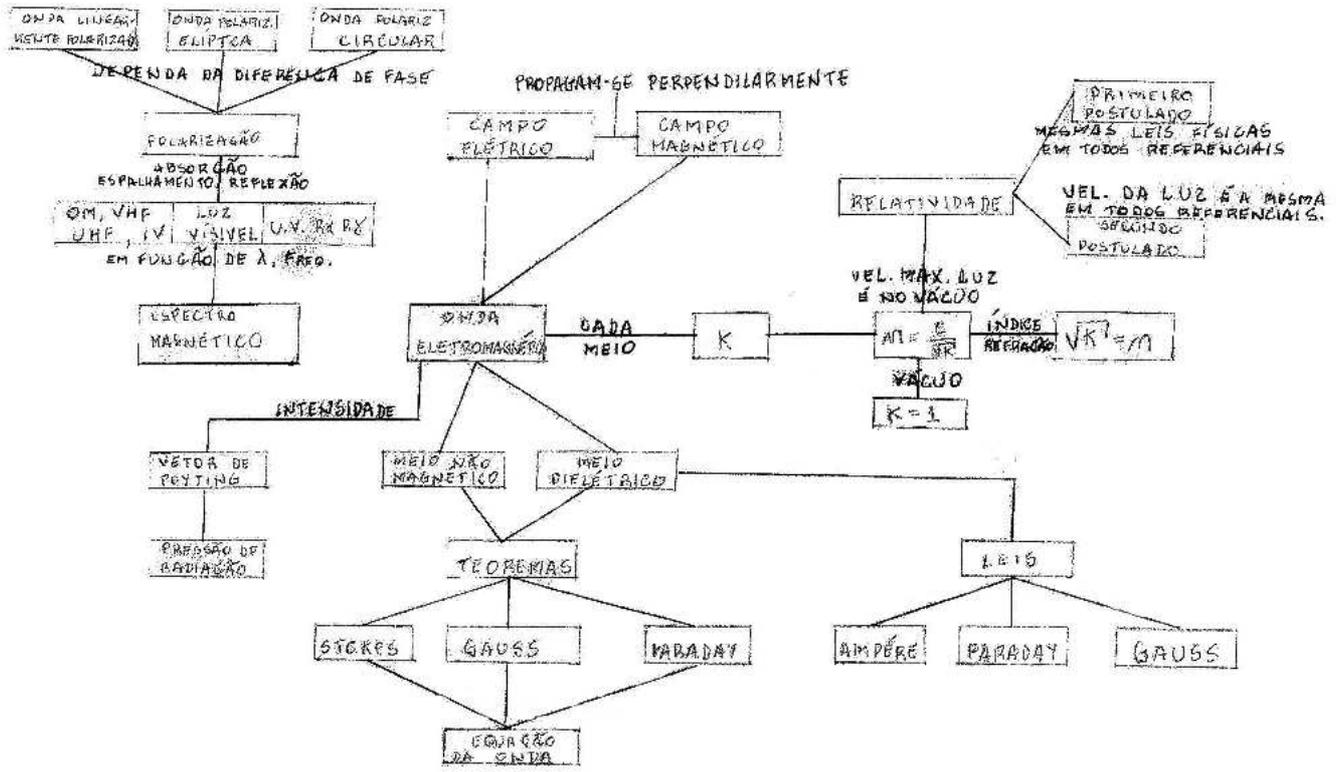
Aluno: 7 – MC1(7)



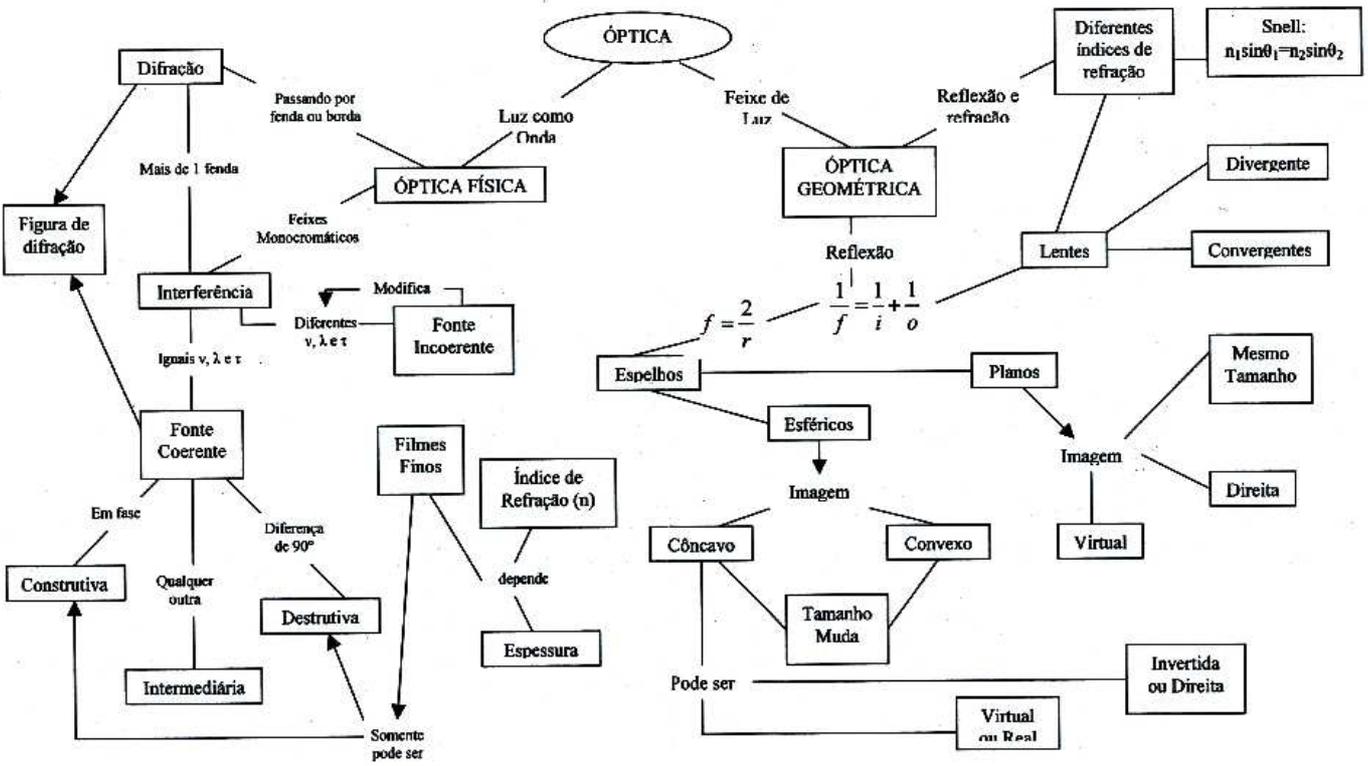
Aluno: 8 – MC1(8)

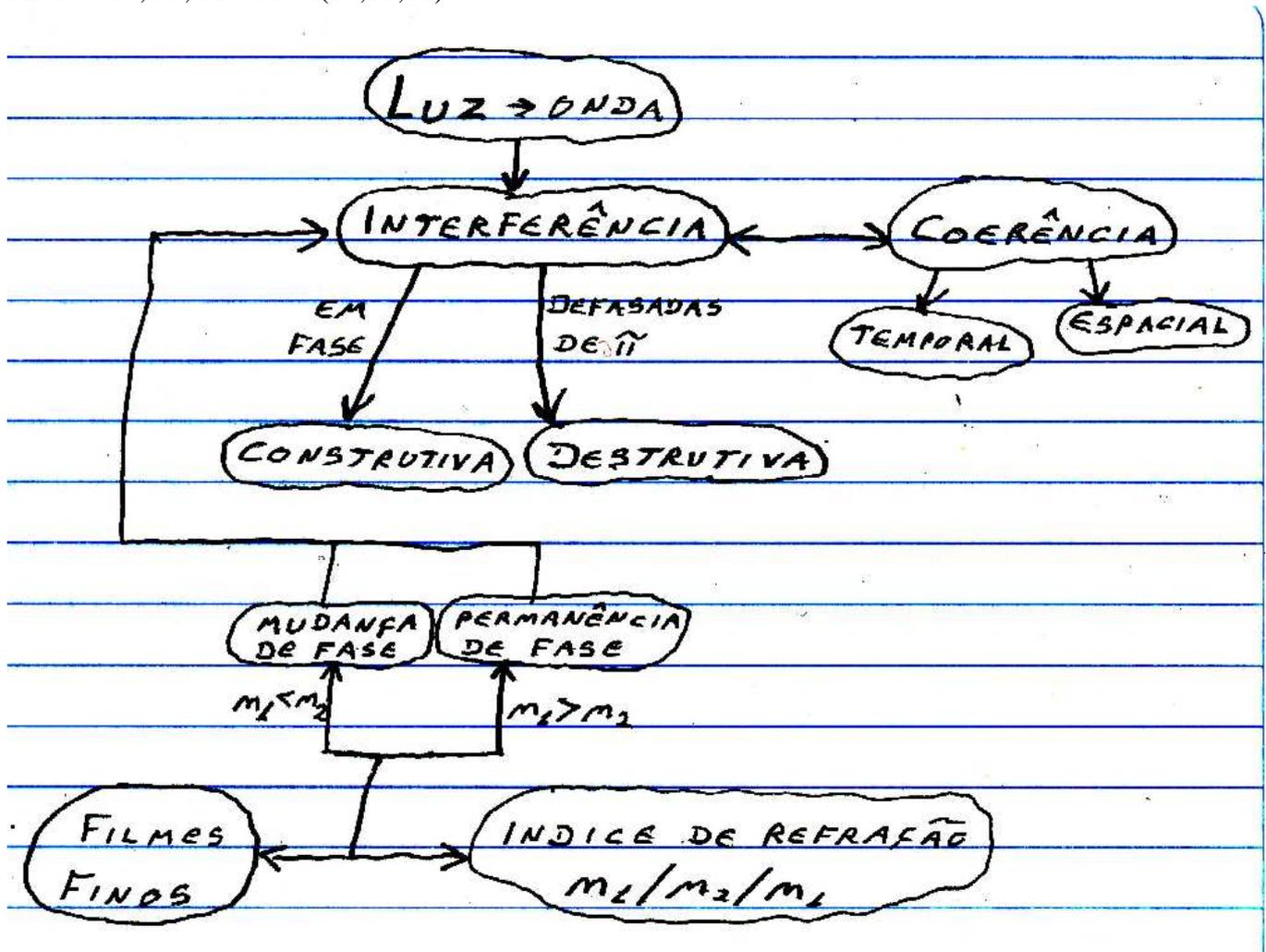
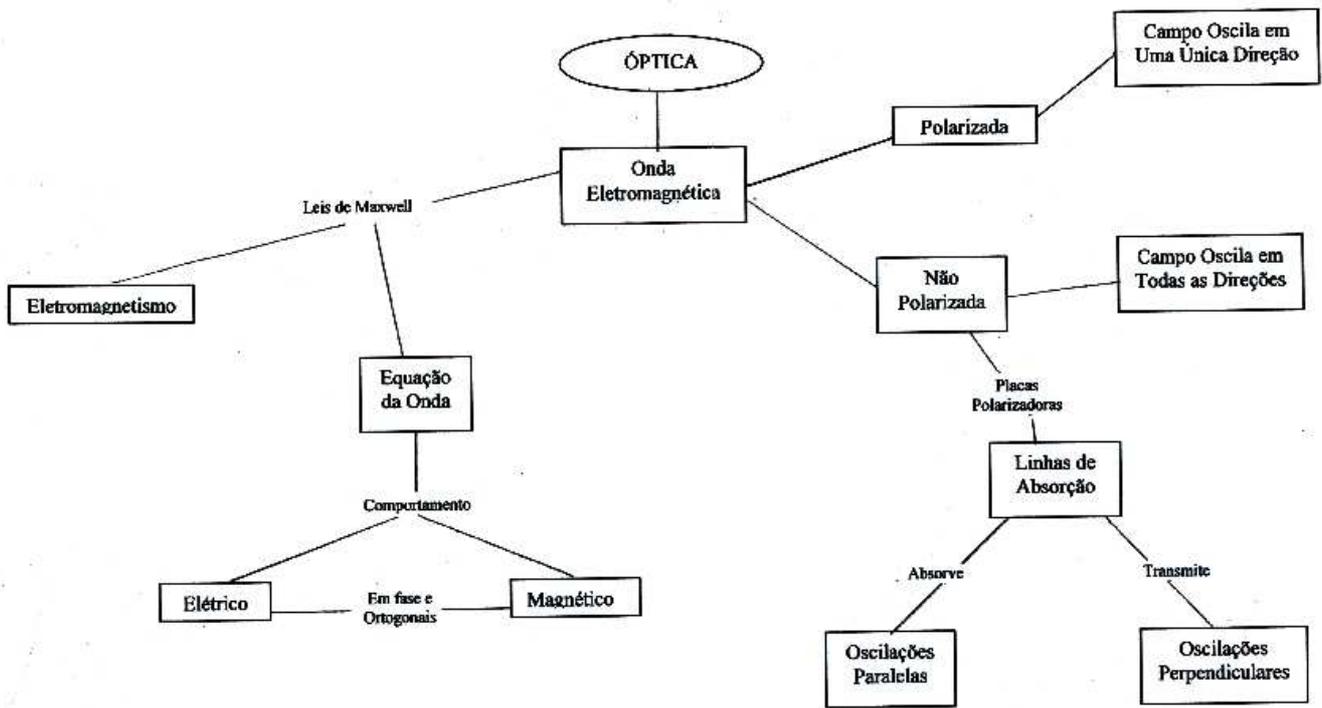


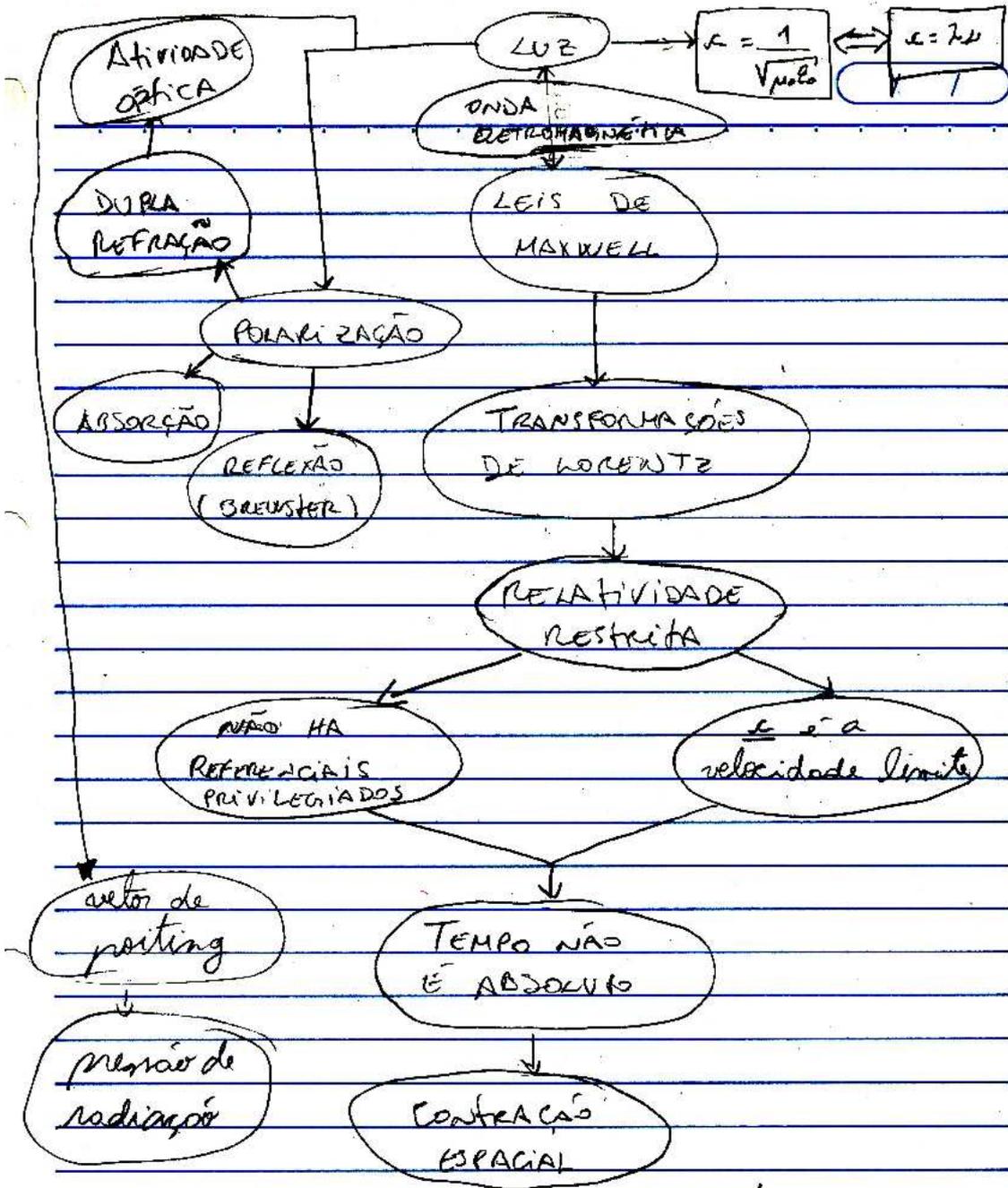
Aluno: 8 – MC2(8)



Aluno: 9 – MC1(9)

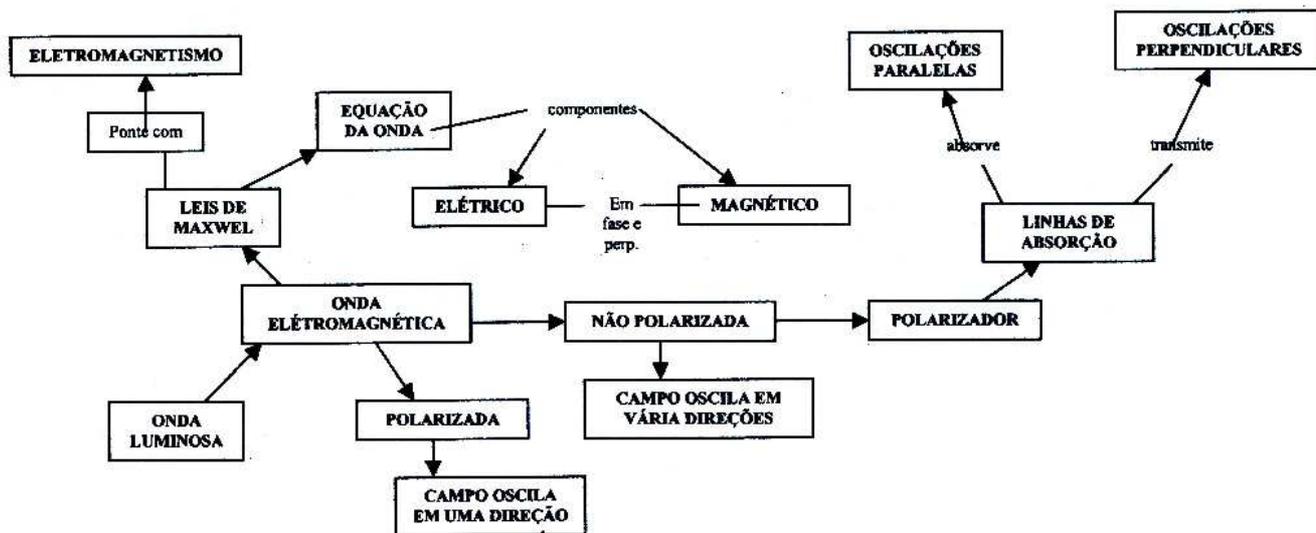




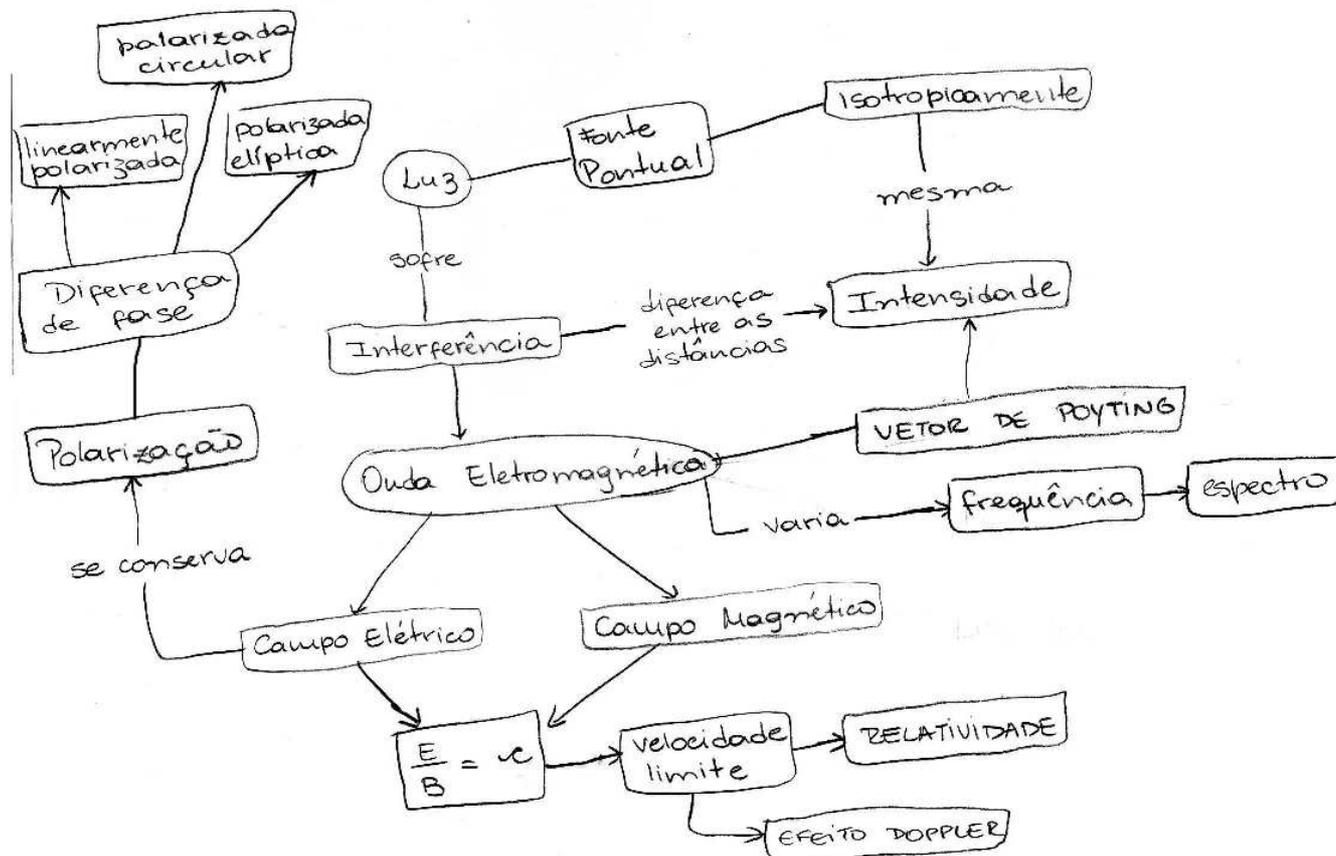


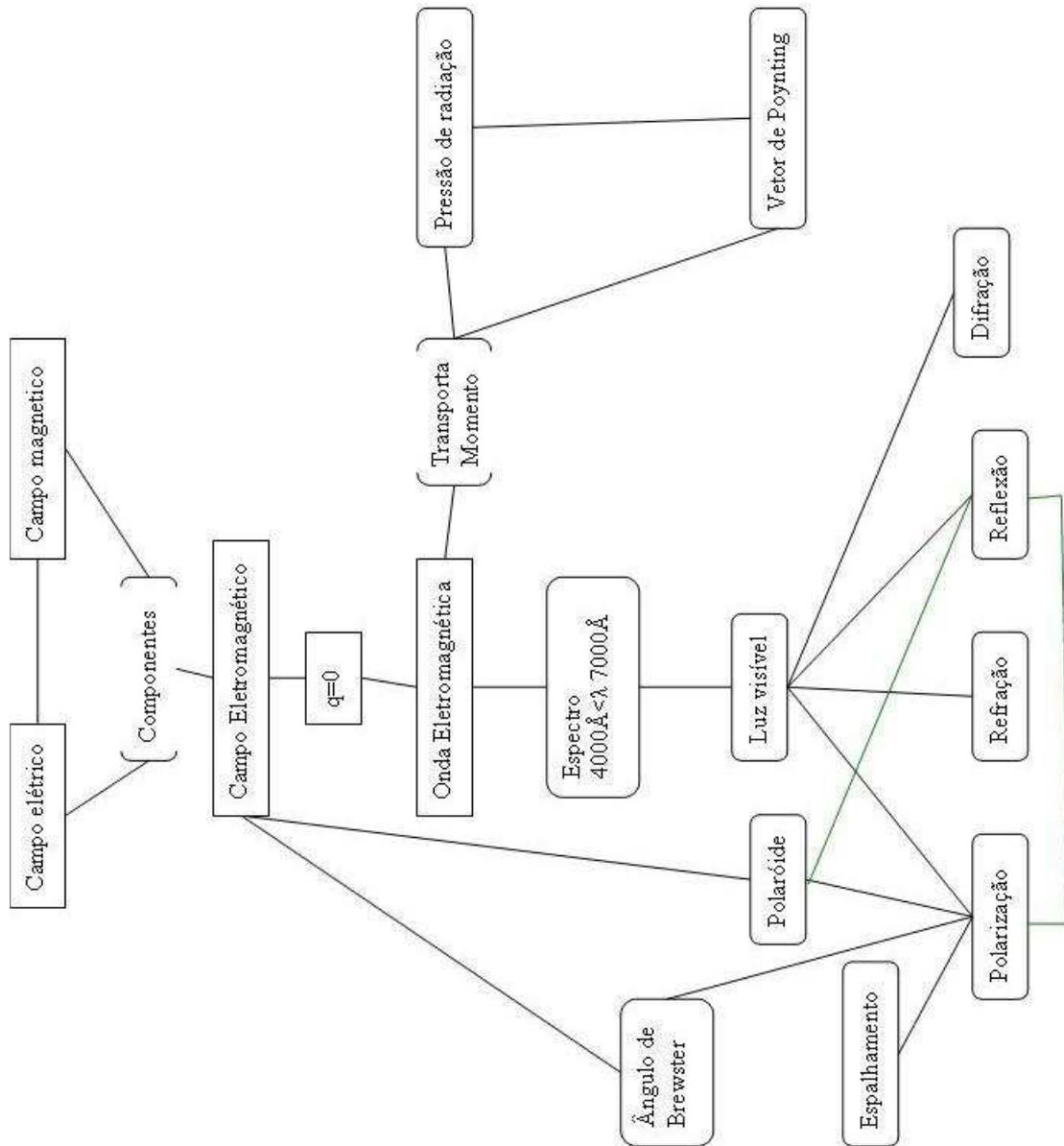
1

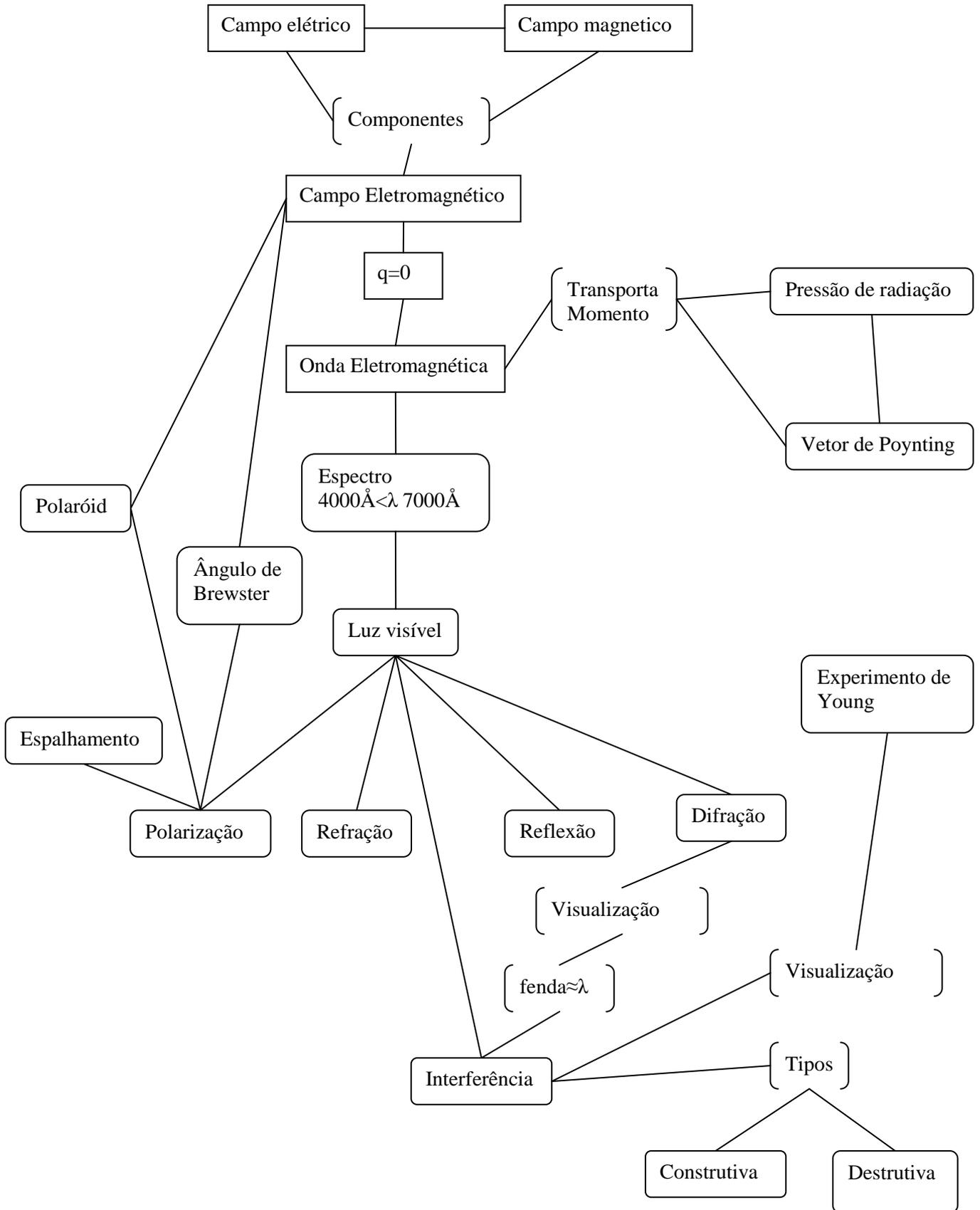
Aluno: 13 – MC3(13)

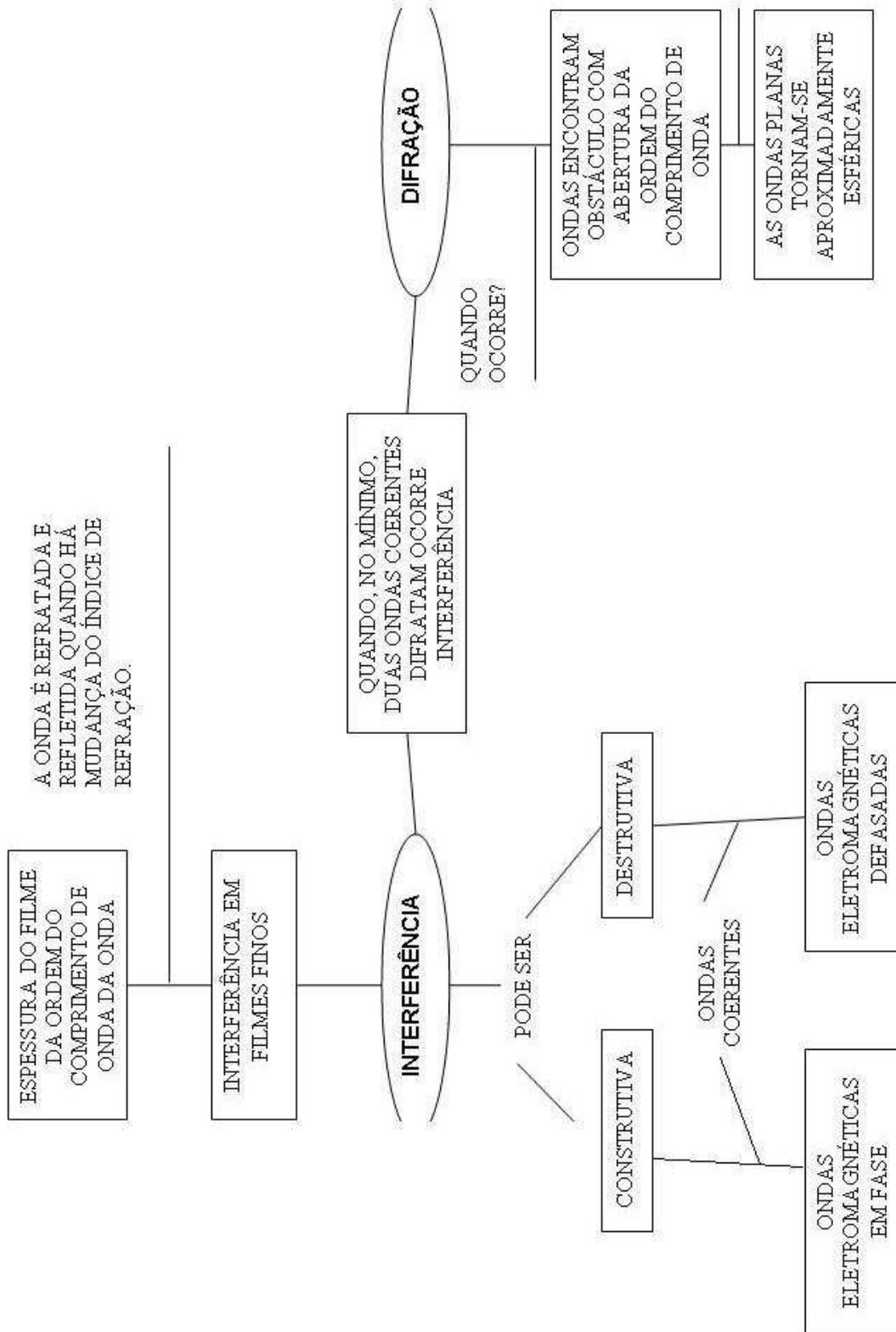


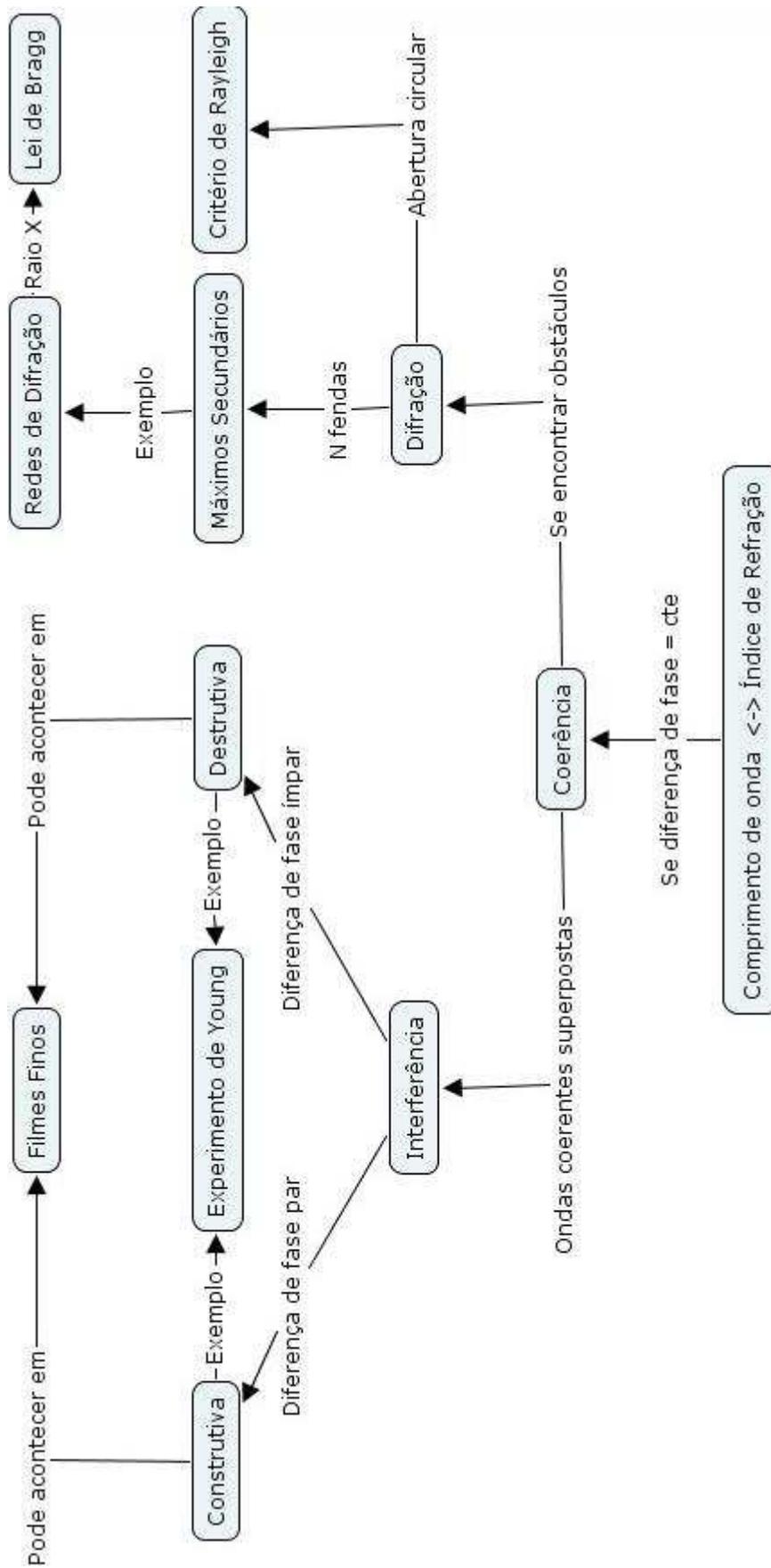
Aluno: 14 – MC1(14)



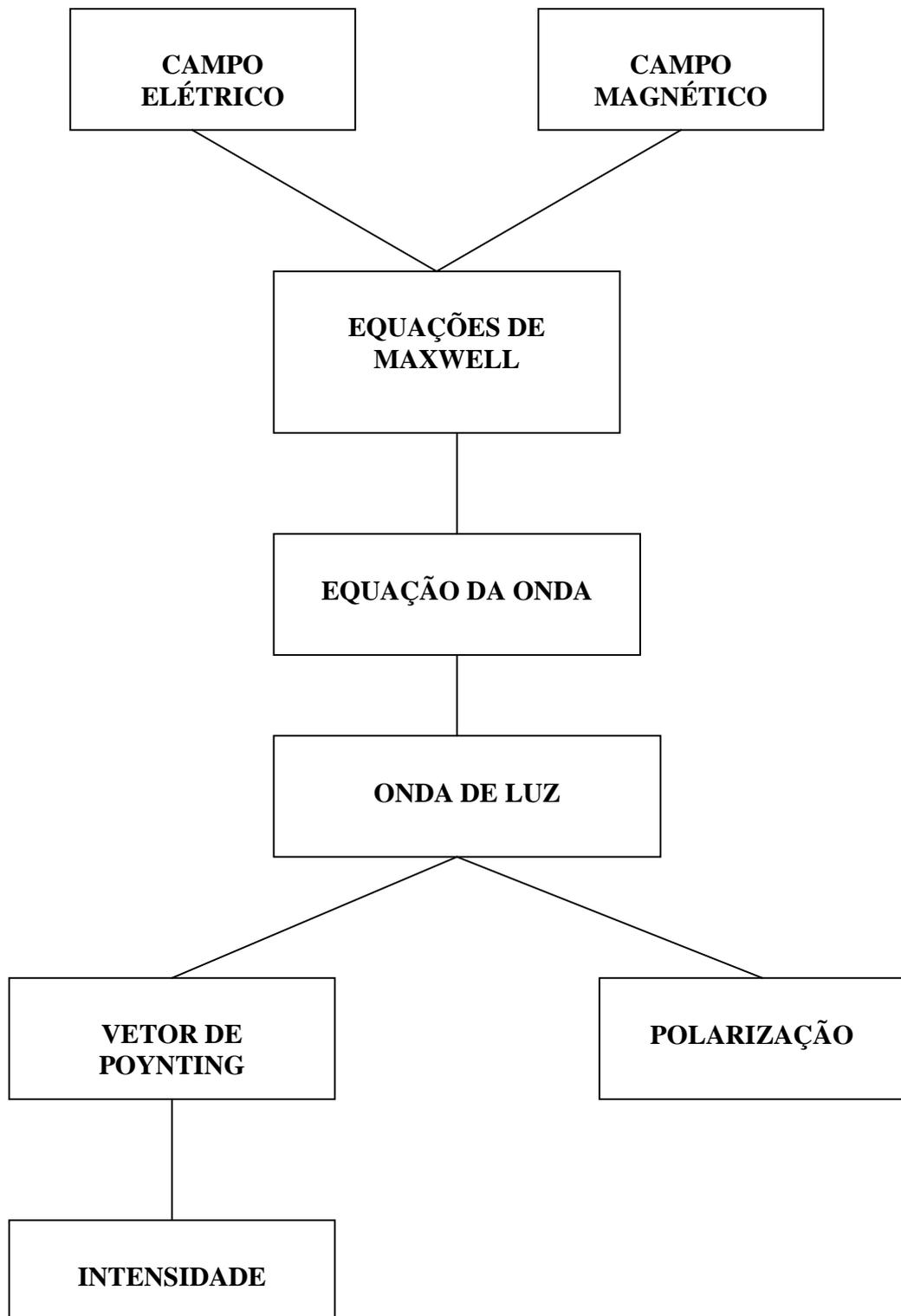




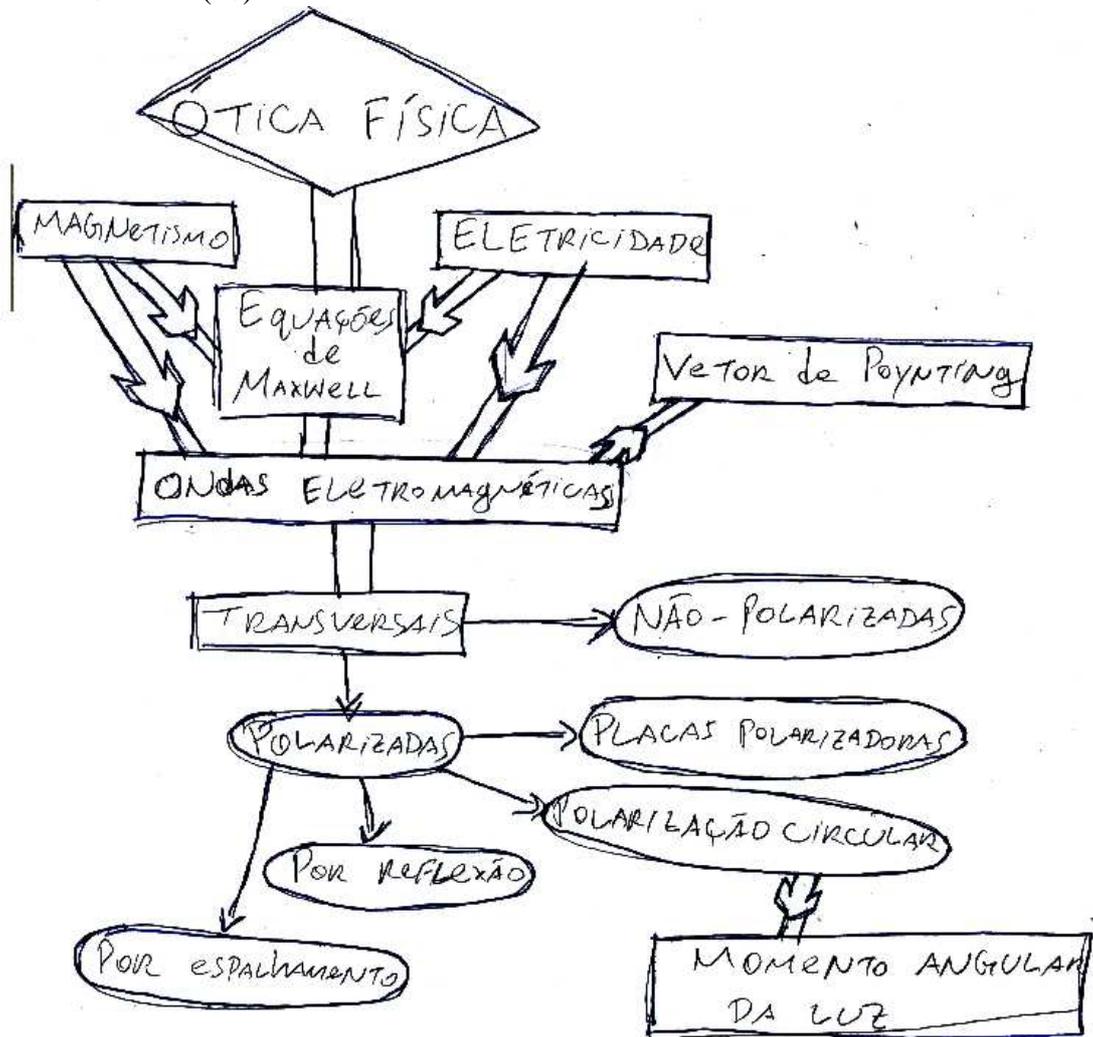




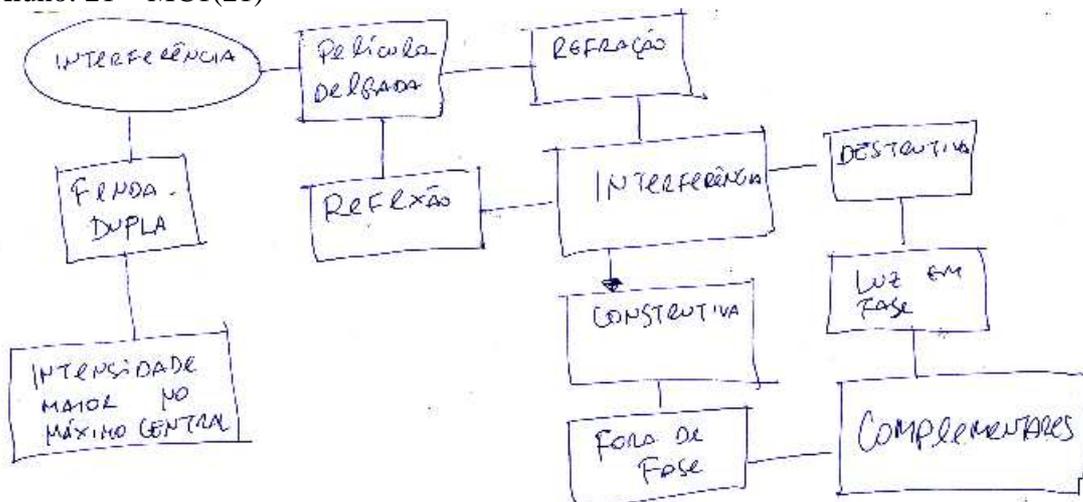
Aluno: 19 – MC1(19)



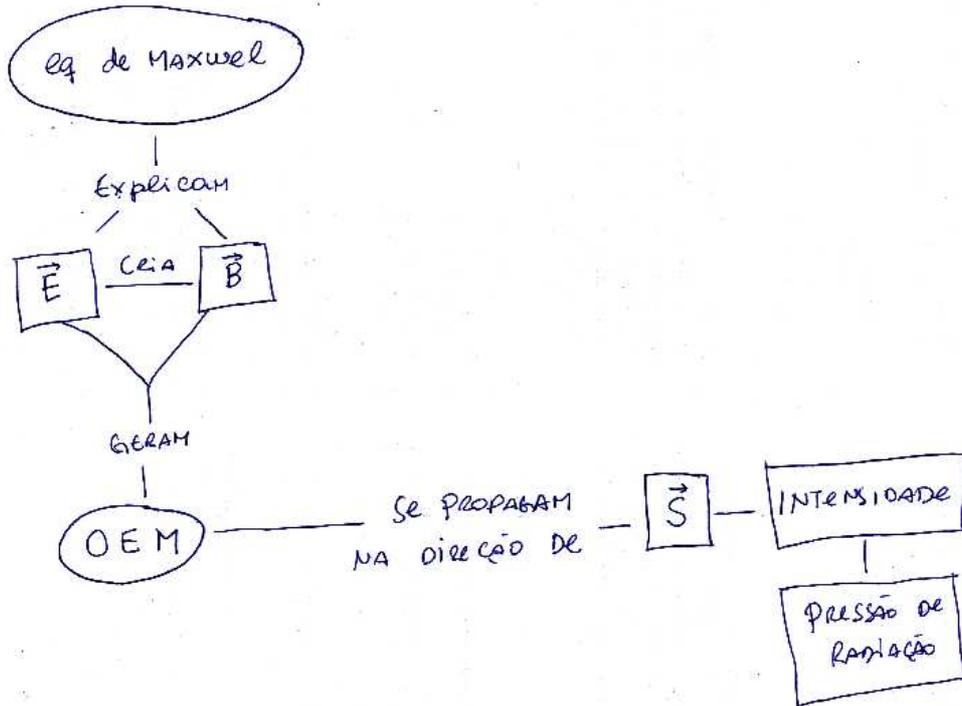
Aluno: 20 – MCI(20)

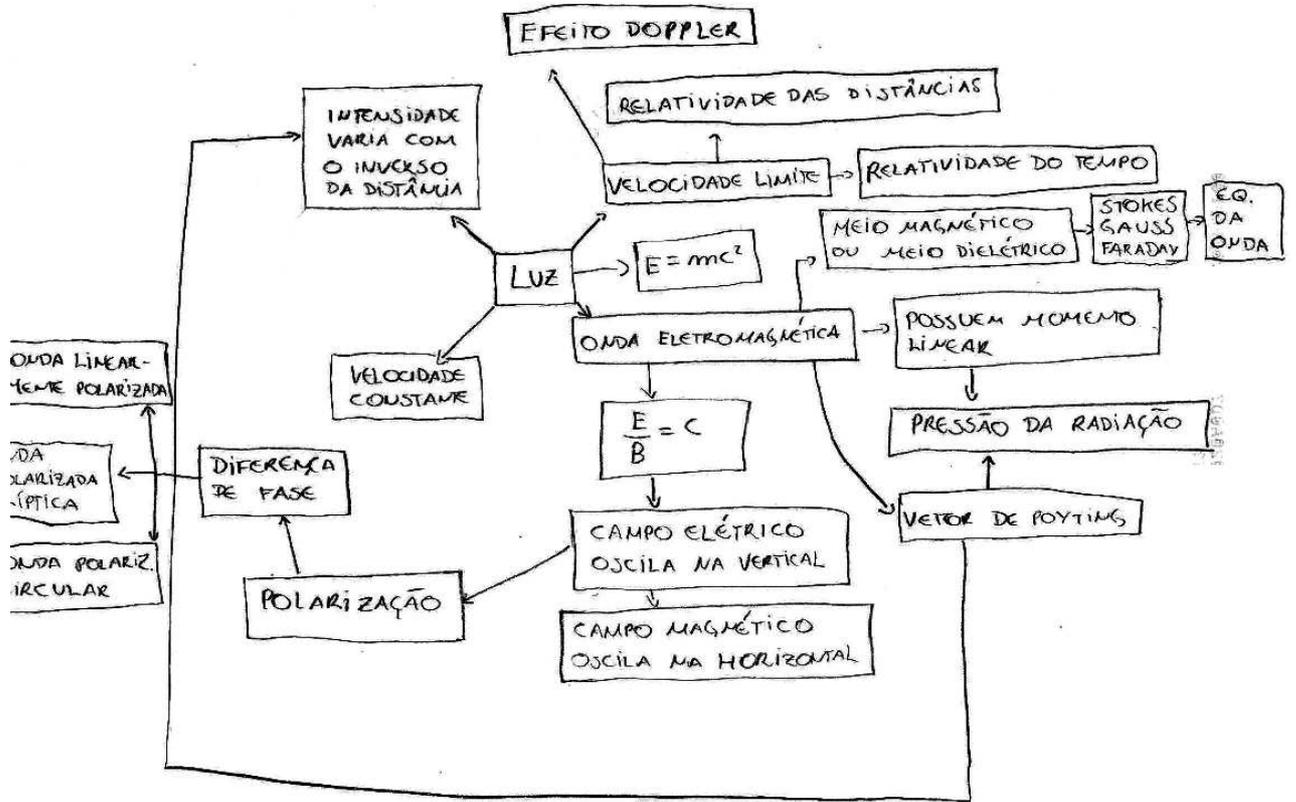


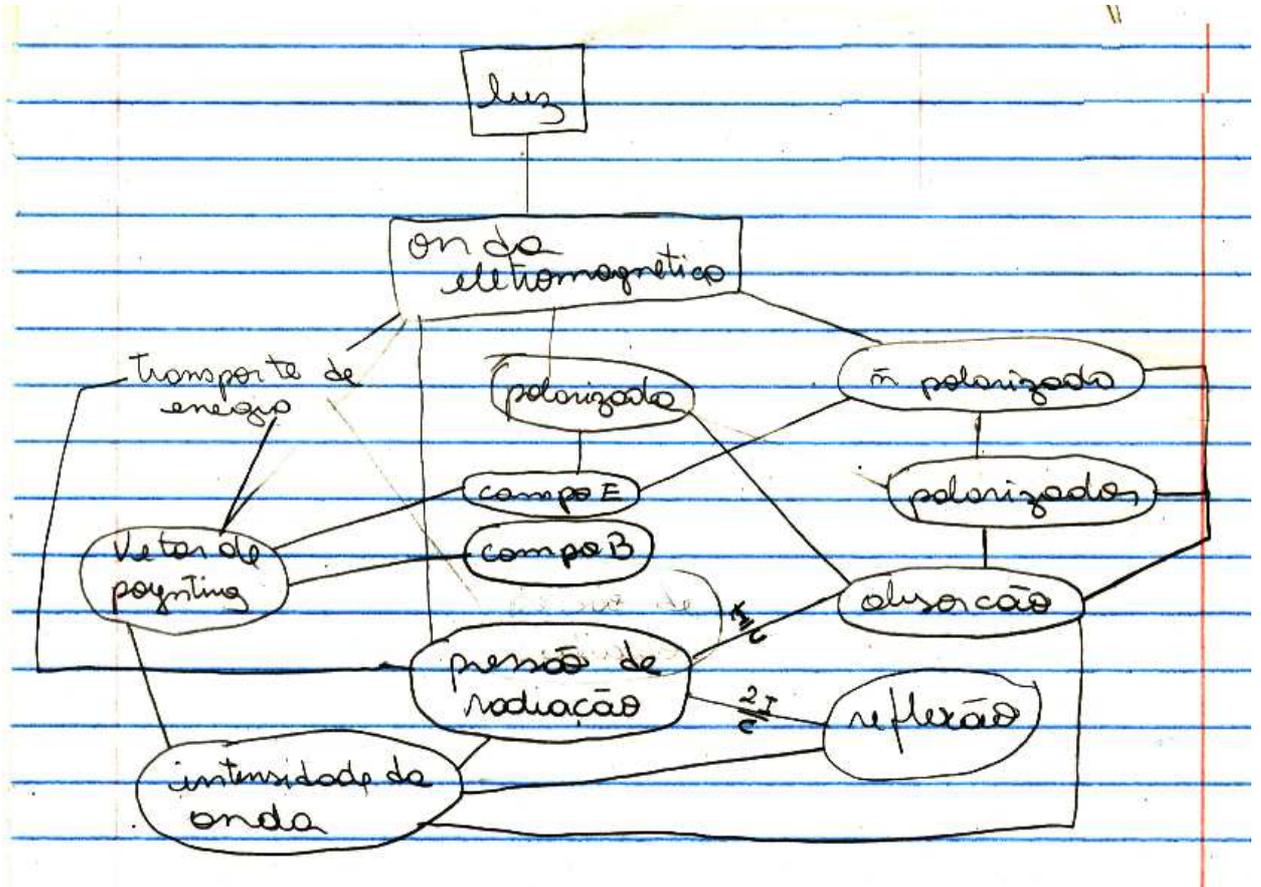
Aluno: 21 – MCI(21)

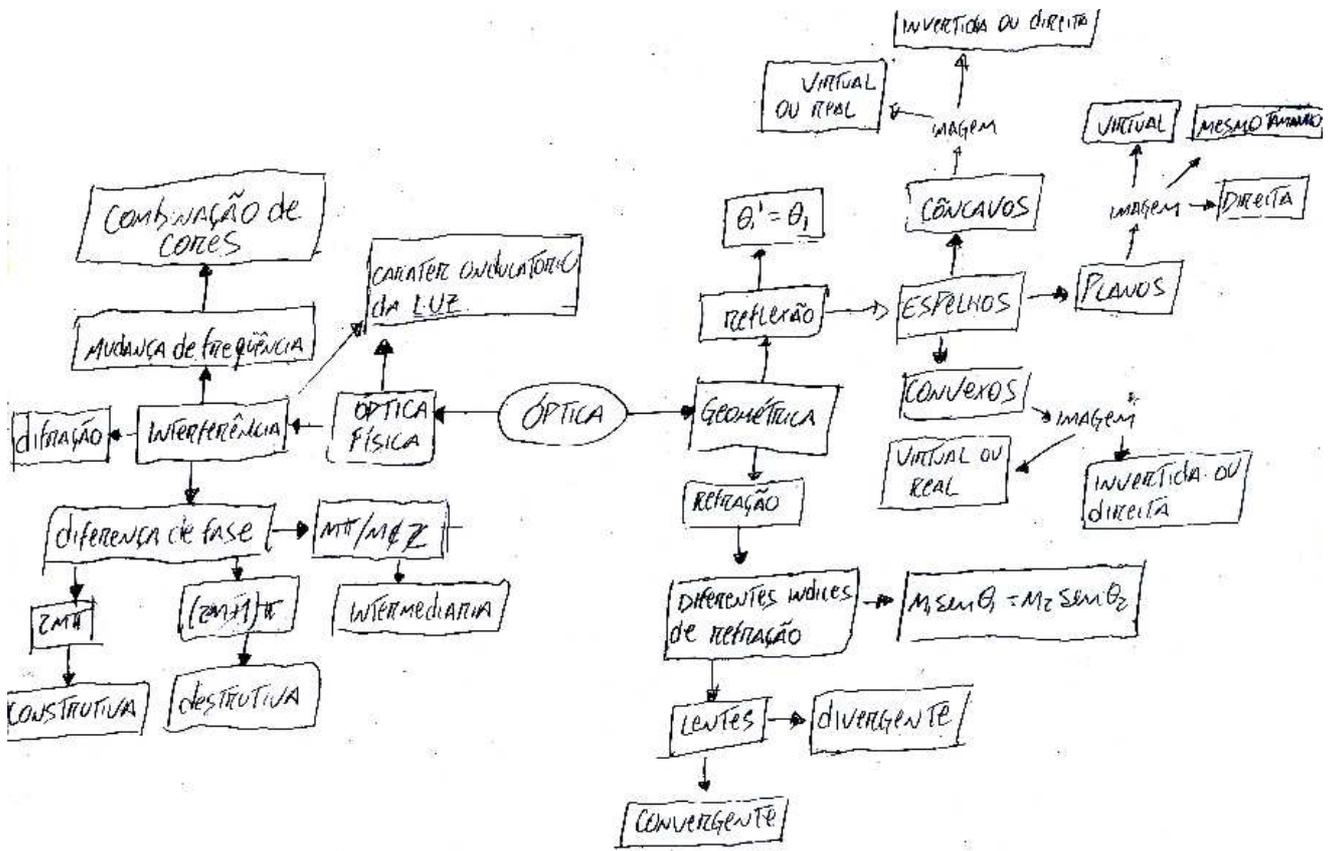


MAPA DAS ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS :

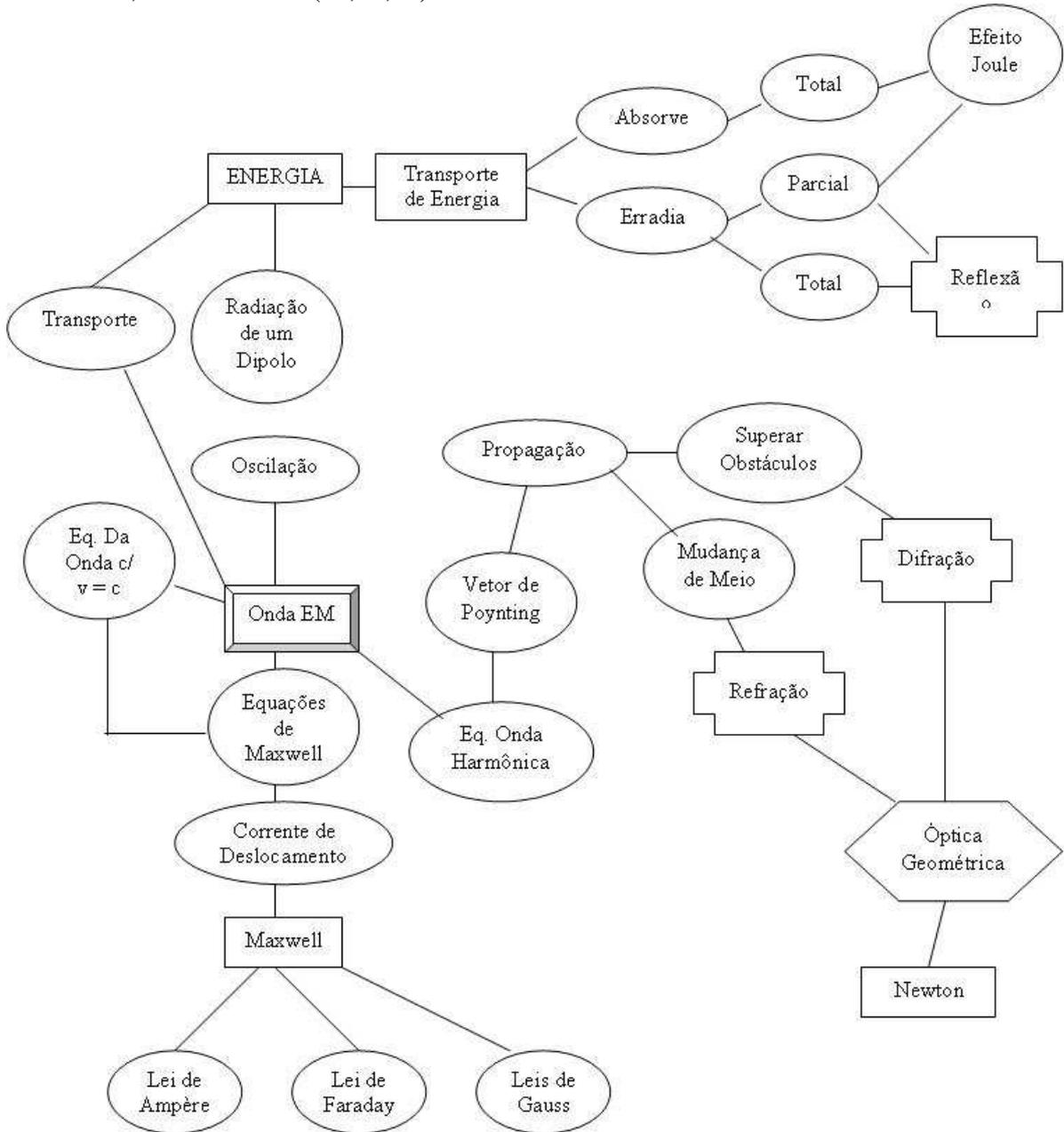


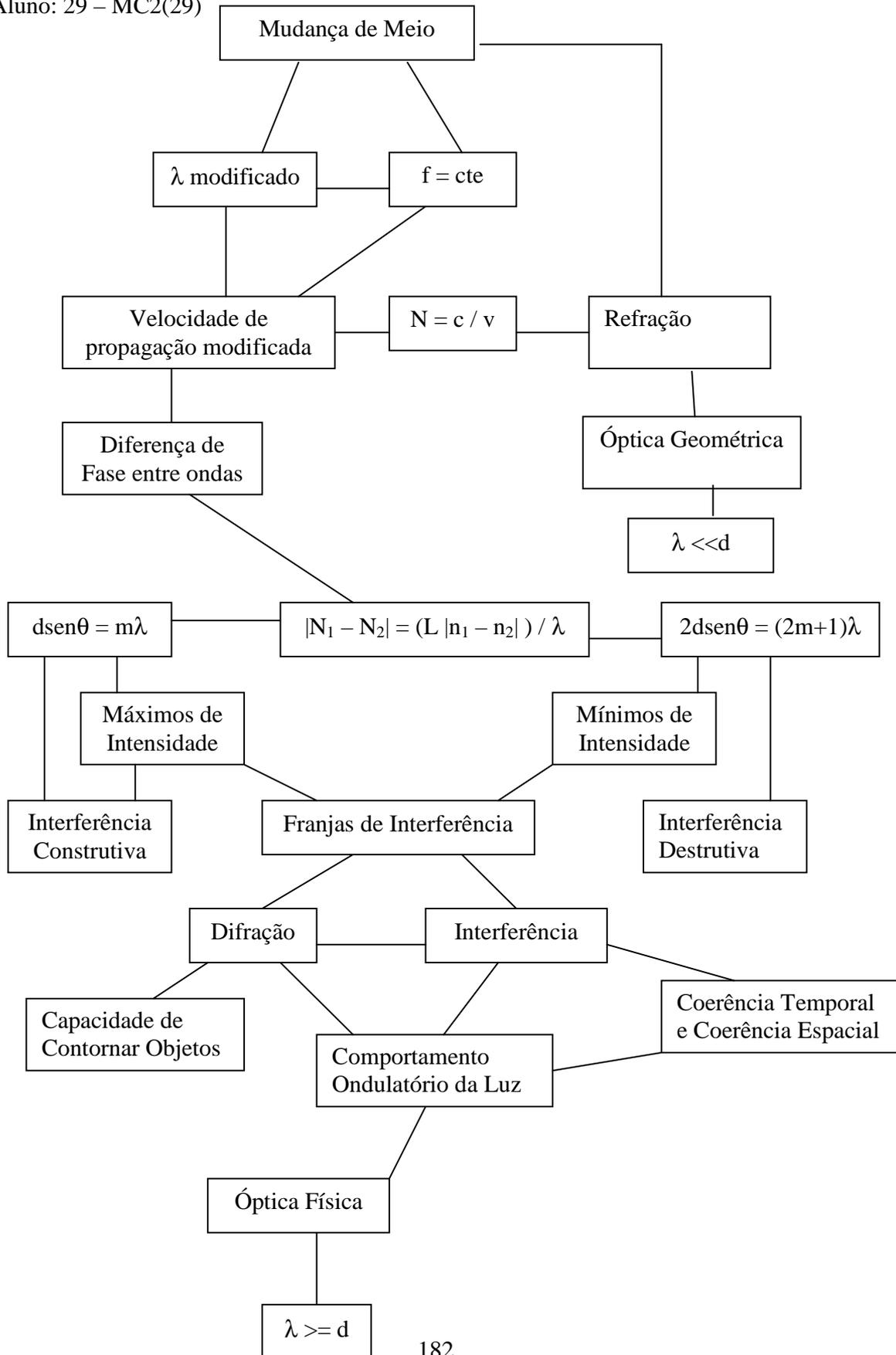


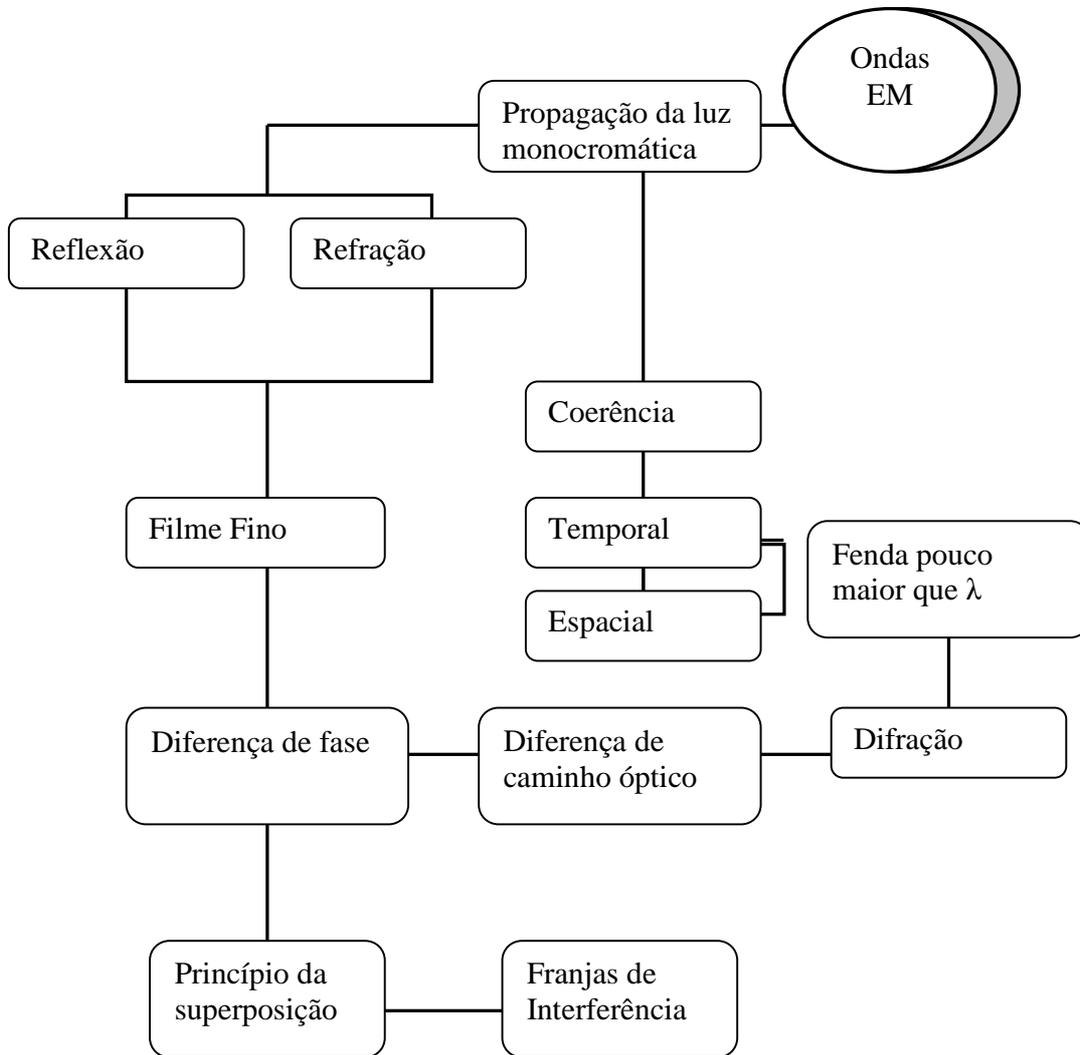




Alunos: 18, 28 e 29 – MC1(18;28;29)







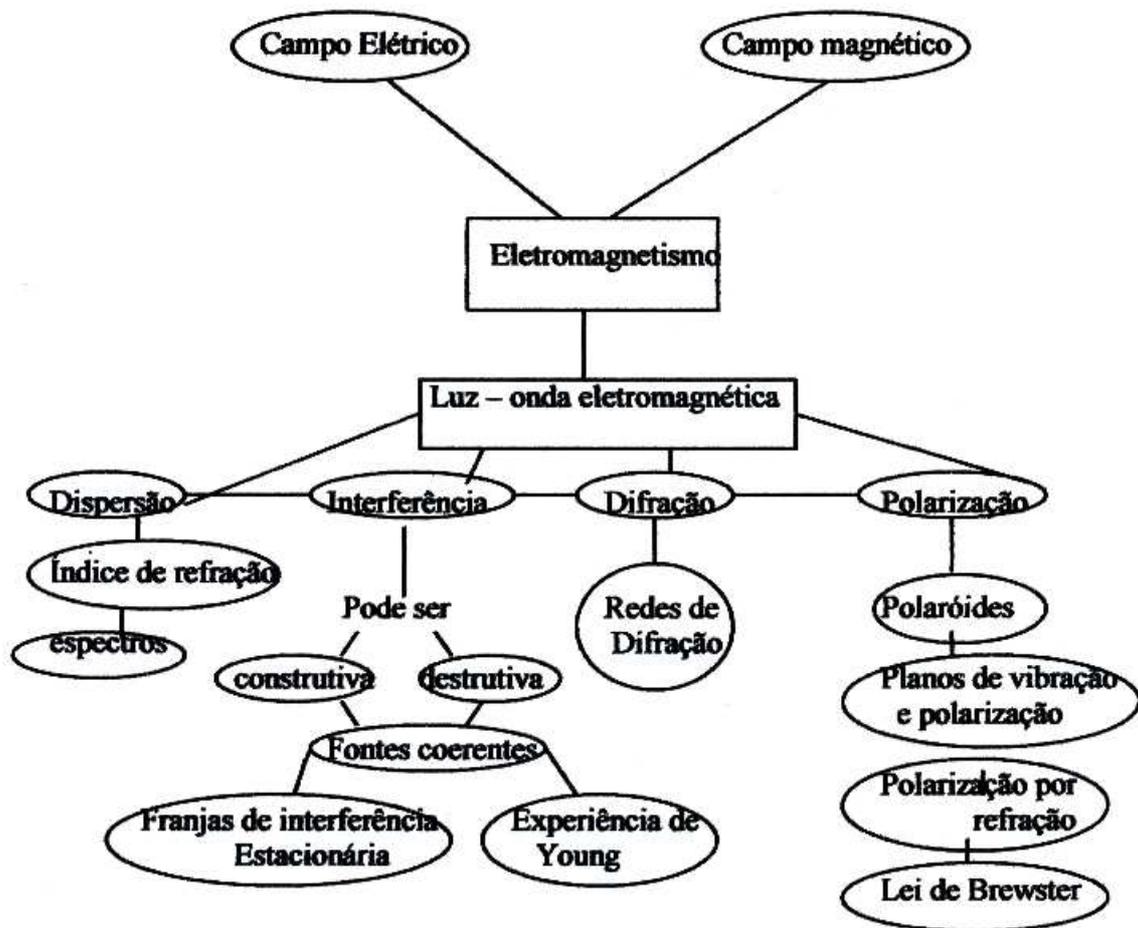
Caso haja mais de um λ , serão observadas franjas coloridas conforme λ . Quanto maior λ , maior será o ângulo do primeiro mínimo.

Quanto mais próxima de λ for a fenda, maior será a difração com perda de intensidade pois menor será o número de vetores campo elétrico a serem somados

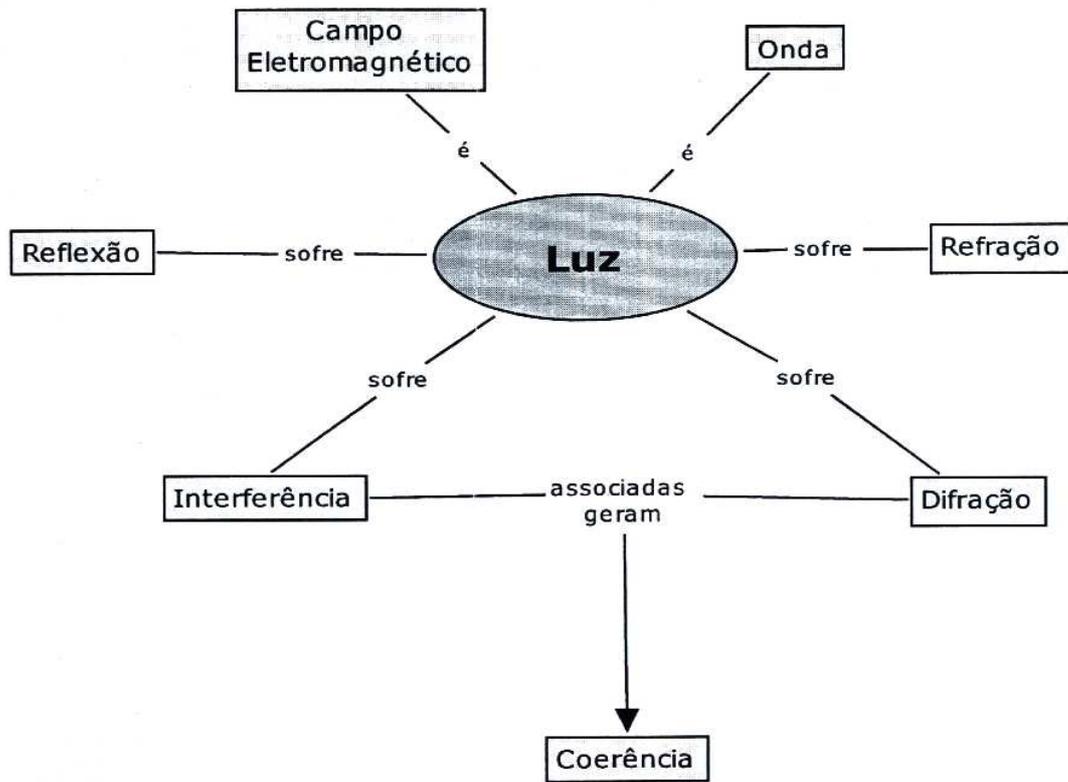
O princípio da superposição vale para intensidades não muito altas.

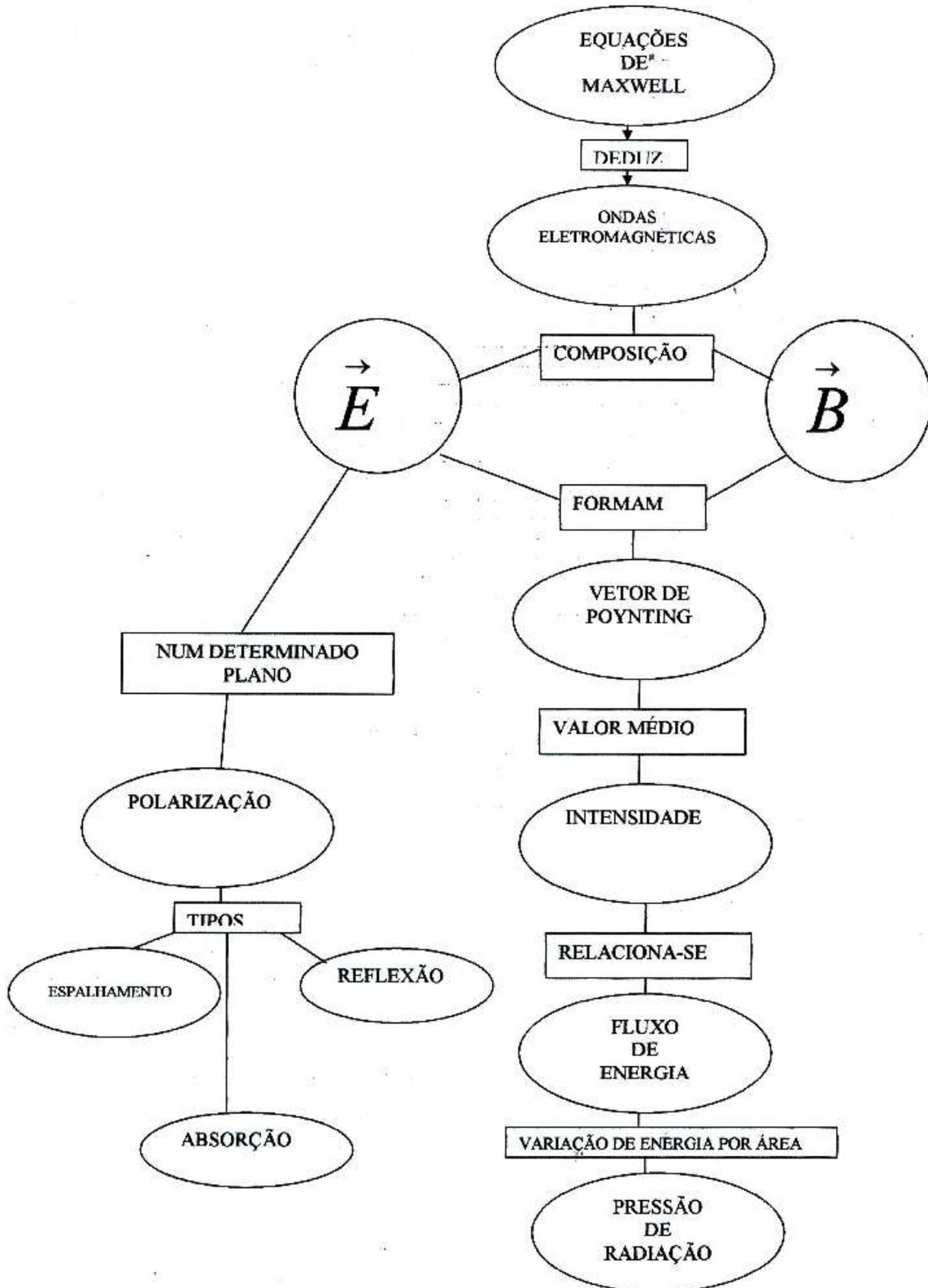
Com uma rede de difração aparecerão N-2 máximos secundários

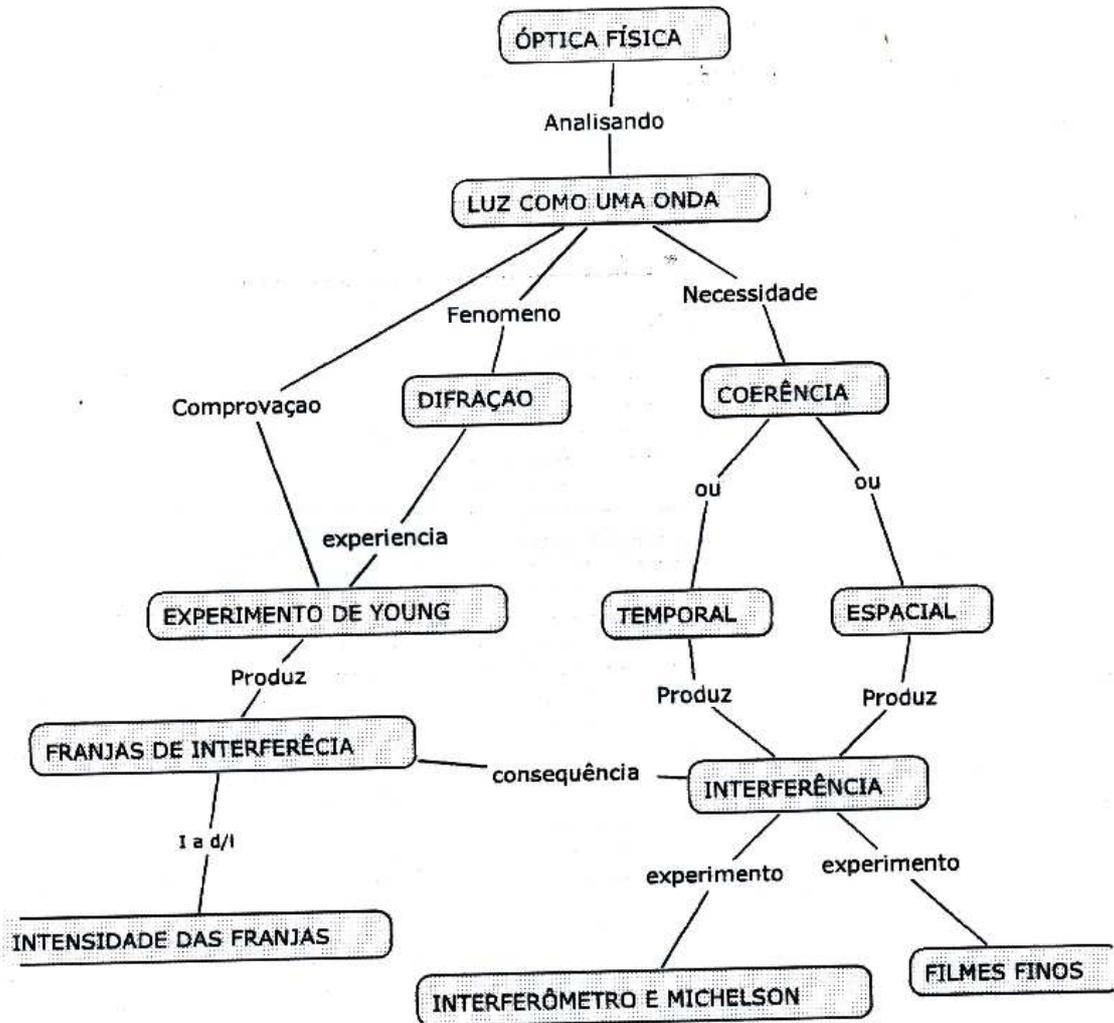
Com uma rede de difração aparecerão N-1 mínimos absolutos

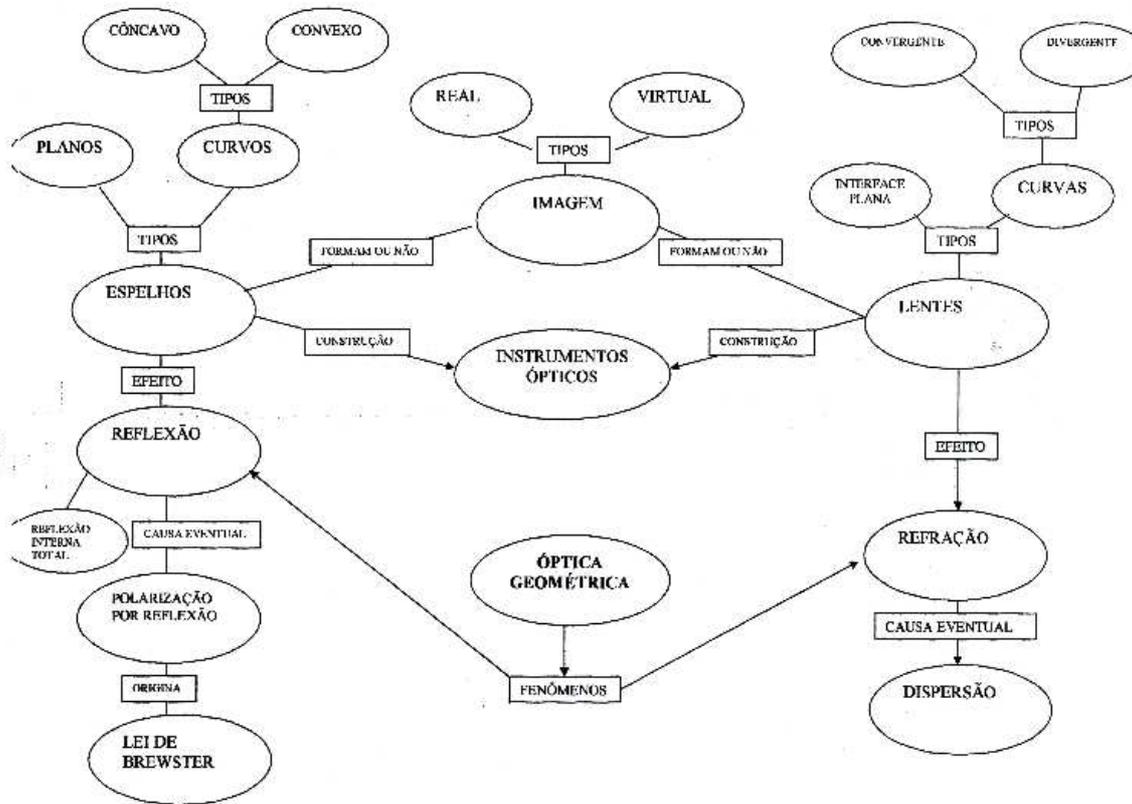


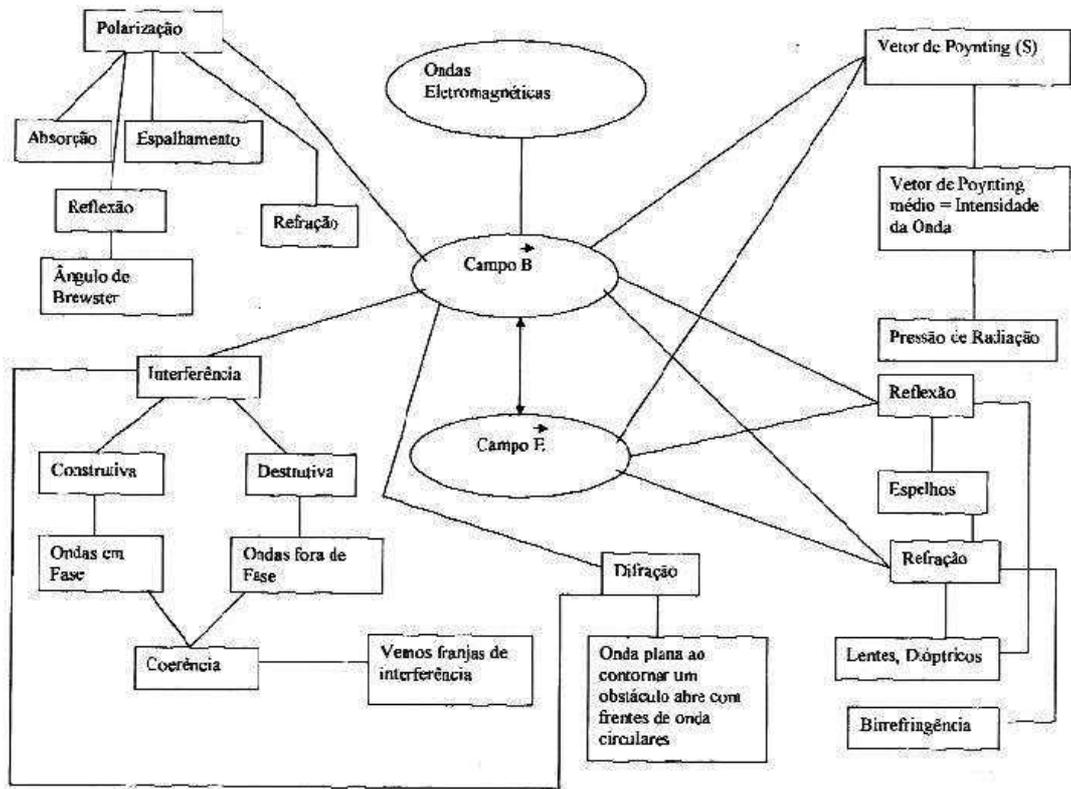
Aluno: 31 – MC1(31)











Apêndice F

Material de apoio disponibilizado aos estudantes do grupo experimental

O que são mapas conceituais¹⁷ ?

De uma maneira ampla, mapas conceituais são apenas diagramas que indicam relações entre conceitos. Mais especificamente, podem ser interpretados como diagramas hierárquicos que procuram refletir a organização conceitual de uma disciplina ou parte dela. Ou seja, sua existência deriva da estrutura conceitual de uma disciplina.

Em princípio, esses diagramas podem ter uma, duas ou mais dimensões. Mapas unidimensionais são apenas listas de conceitos que tendem a apresentar uma organização linear vertical. Embora simples, tais mapas dão apenas uma visão grosseira da estrutura conceitual de uma disciplina ou subdisciplina. Mapas bidimensionais tiram partido também da dimensão horizontal, permitindo, portanto, uma representação mais completa das relações entre os conceitos de uma disciplina. Obviamente, mapas com mais dimensões permitiriam uma representação ainda melhor dessas relações e possibilitariam a inclusão de outros fatores que afetam a estrutura conceitual de uma disciplina. Todavia, mapas bidimensionais são mais simples e mais familiares. Além disso, mapas com mais de três dimensões já seriam abstrações matemáticas, de limitada utilidade para fins instrucionais, ao invés de representações concretas de estruturas conceituais.

Assim sendo, daqui para frente mapas conceituais devem ser entendidos como diagramas bidimensionais que procuram mostrar relações hierárquicas entre conceitos de uma disciplina e que derivam sua existência da própria estrutura conceitual da disciplina.

Mapas conceituais podem ser traçados para toda uma disciplina, para uma subdisciplina, para um tópico específico de uma disciplina e assim por diante. Existem várias maneiras de traçar um mapa conceitual, ou seja, há diferentes modos de representar uma hierarquia conceitual em um diagrama. Além disso, mapas conceituais traçados por diferentes especialistas em uma mesma área de conhecimento, provavelmente, refletirão pequenas diferenças de compreensão e interpretação das relações entre conceitos chave dessa área. O ponto importante é que um mapa conceitual deve ser sempre visto como “um mapa conceitual”, não como “o mapa conceitual” de um determinado conjunto de conceitos. Isto é, qualquer mapa conceitual deve ser visto apenas como uma das possíveis representações de uma certa estrutura conceitual.

Uso de mapas conceituais

De um modo geral, mapas conceituais podem ser usados como instrumentos de ensino e/ou de aprendizagem. Além disso, podem também ser utilizados como auxiliares na análise e planejamento do currículo, particularmente na análise do conteúdo curricular. Todavia, em cada um desses usos, mapas conceituais podem ser sempre interpretados como instrumentos para “negociar significados”.

¹⁷ Extraído do “Textos de apoio ao professor de Física nº 3, 1992 – Mapas conceituais no ensino da Física” de M. A. Moreira – Grupo de Ensino, Instituto de Física – UFRGS.

Mapas conceituais como instrumentos didáticos

Como instrumentos didáticos, os mapas conceituais podem ser usados para mostrar as relações hierárquicas entre os conceitos que estão sendo ensinados em uma aula, em uma unidade de estudo ou em um curso inteiro. Eles explicitam relações de subordinação e superordenação que possivelmente afetarão a aprendizagem de conceitos. São representações concisas das estruturas conceituais que estão sendo ensinadas e, como tal, provavelmente facilitarão a aprendizagem dessas estruturas.

Contudo, contrariamente a textos e outros materiais instrucionais, mapas conceituais não dispensam explicações do professor. A natureza idiossincrática de um mapa conceitual, dada por quem faz o mapa (o professor, no caso), torna necessário que o professor guie o aluno através do mapa quando o utiliza como recurso instrucional. Além disso, apesar de que os mapas podem ser empregados para dar uma visão geral prévia do que vai ser estudado, eles devem ser usados preferentemente quando os alunos já têm uma verta noção do assunto.

Um mapa conceitual possui características que o difere de outros diagramas (organogramas, fluxogramas, etc.), e podem ser destacadas:

- Como o próprio nome sugere, é constituído por conceitos, deve-se evitar colocar nomes de autores, expressões matemáticas, etc.
- Os conectores que estabelecem as relações entre os conceitos, devem ser nomeados, de forma que a palavra ou frase (curta) possa representar a relação entre os conceitos interligados;
- Não é auto-explicativo, ou seja, um mapa conceitual deve ser acompanhado de uma explicação. O construtor do mapa deve apresentá-lo ou oferecer um texto explicativo do mesmo, explicitando e/ou justificando as relações e, quando for o caso, as não-relações. Ademais, a hierarquia conceitual pode assumir diversas formas de representação, sendo necessário que o autor do mapa também comente sobre o seu critério de classificações para representar os principais conceitos do mapa.

Abaixo são apresentados alguns exemplos de mapas conceituais:

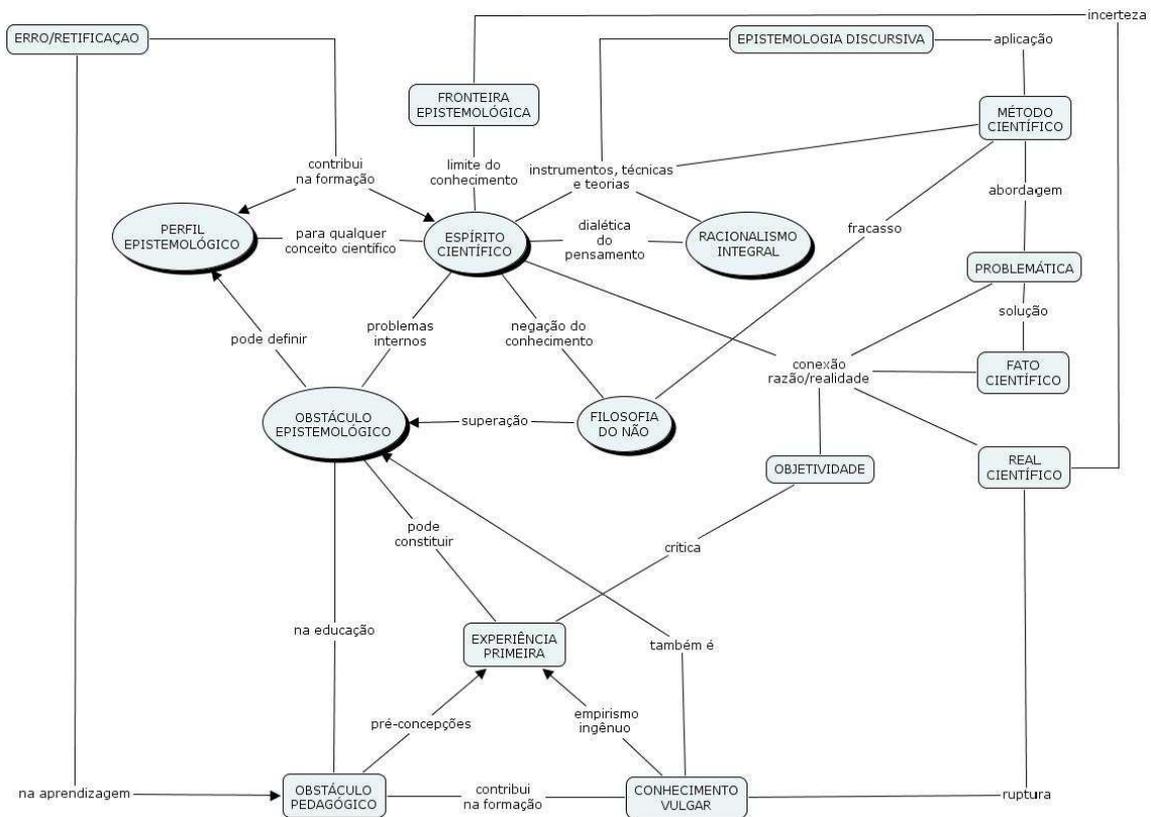


Figura 1: Um mapa conceitual para a epistemologia de Gaston Bachelard. (Voltaire, 2005)

Neste mapa conceitual, os conceitos-chave estão colocados dentro de elipses, enquanto que os demais são secundários. Todos os conectores estão nomeados e identificam as relações de significado entre os conceitos do mapa. Considerando que um mapa conceitual não é auto-explicativo, seria necessário que fosse acompanhado de alguma explicação mais detalhada, caso fosse apresentado como instrumento didático, para que o leitor compreendesse tal exposição. Mesmo considerando que já tivesse algum conhecimento sobre a epistemologia bachelardiana, pois assim o construtor do mapa poderia explicar o porquê das relações entre os conceitos e, inclusive, alguma relação que não fez. Contudo, sua apresentação neste texto é meramente ilustrativa.

A figura seguinte é outro exemplo de um mapa conceitual:

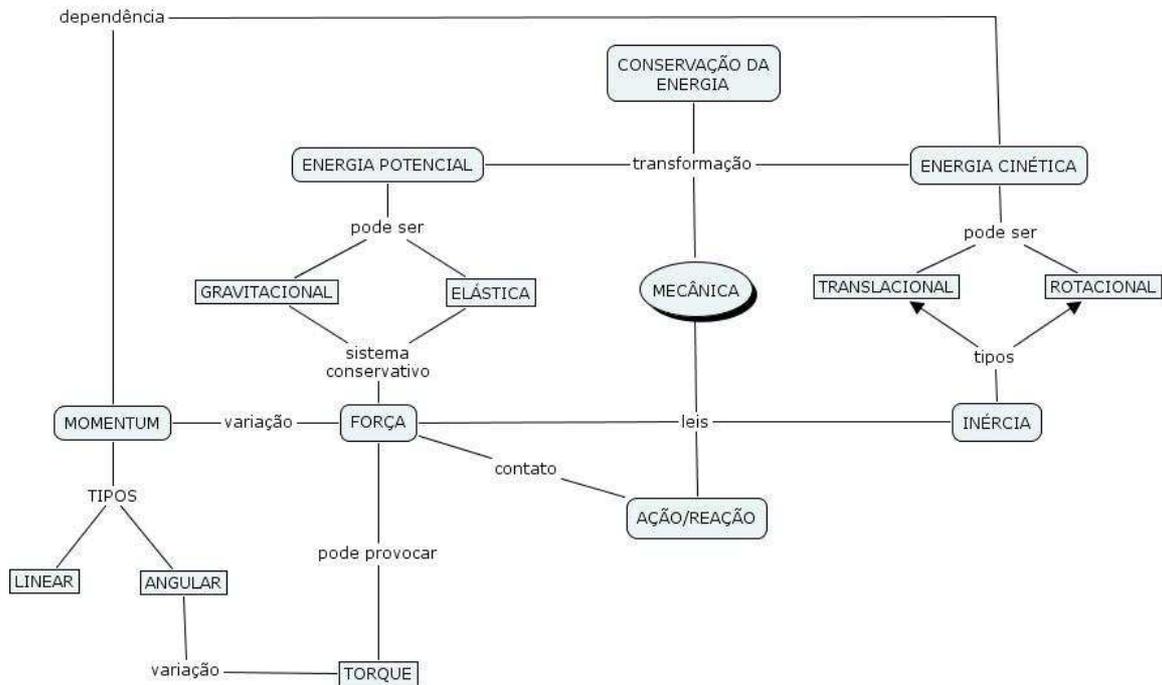


Figura 2: Um mapa conceitual para a Mecânica Clássica não-relativística (Voltaire, 2004)

Neste mapa, o conceito central está colocado em uma elipse. Considerando que os outros conceitos são todos subordinados a ele.

É importante destacar que não há uma forma correta para dispor os conceitos em um mapa, como já foi mencionado, não existe “o mapa conceitual”, o construtor do mapa é livre para expor os conceitos na forma que lhe for mais conveniente e de acordo com sua compreensão. Além disso, a hierarquização conceitual não precisa partir, necessariamente, do topo do mapa, mas pode ter uma origem no seu centro, por exemplo. A escolha por caixas, elipses, formas para a inserção dos conceitos também é variável, podem ou não ser adotados. Devido a toda essa variabilidade, torna-se importante a discussão do mapa que foi apresentado, por exemplo, por um aluno. Pode ocorrer, portanto, a negociação de significados entre aluno e professor, o que torna possível avaliar o nível de entendimento do aluno em relação a determinado conteúdo.

Na página seguinte, há outro exemplo de um mapa conceitual, mas utilizado para a organização de conteúdo:

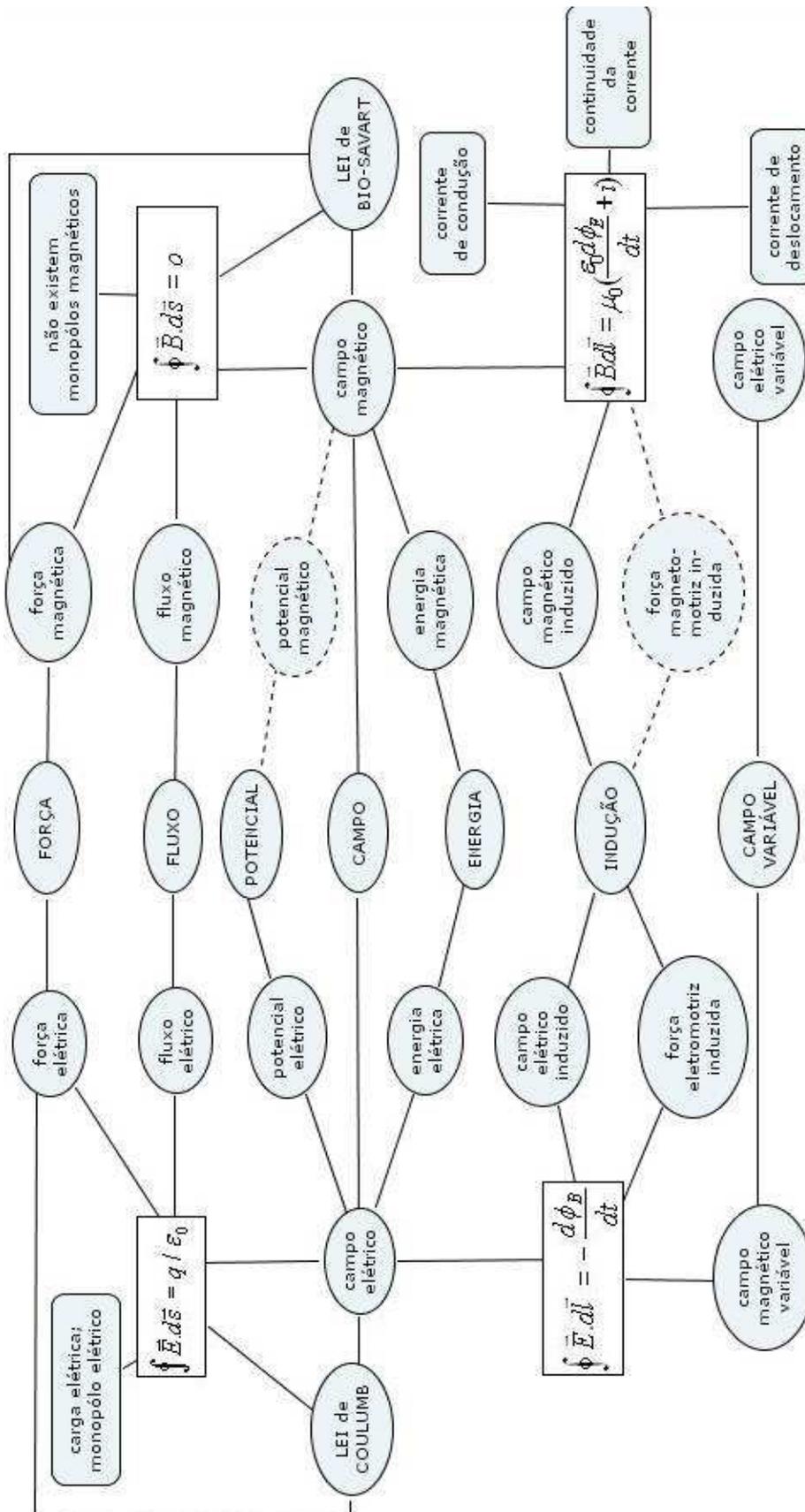


Figura 3: Um mapa conceitual para o conteúdo de Eletromagnetismo (Moreira, 1977, 1979, 1983; Moreira e Buchweitz, 1987)

Este último exemplo refere-se a um mapa sobre os conceitos do eletromagnetismo, elaborado por um professor do Instituto de Física da UFRGS. Este mapa foi traçado para que o próprio professor pudesse organizar a estrutura da disciplina, buscando a simetria entre as informações, a partir dos conceitos fundamentais colocados nas elipses centrais. Consiste em um mapa para organização de informações. Por isso, e por dominar a técnica dos mapas conceituais, o professor não nomeou os conectores e ainda adicionou as quatro equações de Maxwell.

LUZ COMO UMA ONDA... ELETROMAGNÉTICA¹⁸

Ao abordarmos os tópicos da Óptica, em alguns casos iniciamos o estudo pela aproximação representada pelos “raios de luz”, tratada na Óptica Geométrica, que pressupõe a propagação retilínea da luz. Tal aproximação é útil para estudarmos os efeitos de reflexão, refração, formação de imagens, em espelhos, lentes, etc. Entretanto, facilmente se percebe os limites desse modelo (raio de luz) ao considerarmos os efeitos ondulatórios da luz. A teoria ondulatória da luz sugerida por Christian Huygens em 1678, explica os efeitos da refração e reflexão em termos de ondas e atribui um significado físico ao índice de refração. Além disso, permite-nos estudar os efeitos de interferência e difração das ondas luminosas. O princípio fundamental da teoria ondulatória de Huygens é a seguinte:

Todos os pontos de uma frente de onda funcionam como fontes pontuais para ondas secundárias. Depois de um tempo t, a nova posição da frente de onda será dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias.

O modelo ondulatório da luz permite estudar os efeitos característicos como a interferência e a difração. Dessa forma, atribuímos para a luz as quantidades características das ondas, como a frequência, a amplitude, a fase, etc. Contudo, até o momento, não há referência explícita do seu caráter vetorial, identificado por seus componentes: os campos elétrico e magnético. Foi James Clarck Maxwell quem mostrou que a “luz visível” é um ramo do Eletromagnetismo, pois um feixe de luz é uma configuração dos campos elétrico e magnético que se propagam, definindo a luz como uma onda eletromagnética.

O estudo do Eletromagnetismo Clássico pode ser resumido em quatro equações, as conhecidas equações de Maxwell, que são, na forma integral, as seguintes:

$$1) \oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{q}{\epsilon}$$

$$2) \oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$$

$$3) \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t}$$

$$4) \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu \epsilon \frac{\partial \phi_E}{\partial t} + \mu i$$

Pode-se, facilmente, passar da forma integral para a diferencial, aplicando o teorema de Stokes e o teorema do divergente:

A primeira equação pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \int \frac{\rho dV}{\epsilon} \quad \text{Onde “}\rho\text{” é a densidade de carga e “}dV\text{” o elemento de volume.}$$

$$\text{Ou seja, } q = \int \rho dV$$

¹⁸ Texto elaborado contendo alguns trechos do livro “Fundamentos de Física 4: Ótica e Física Moderna – Halliday, Resnick e Walker – 4ª edição”.

De acordo com o teorema do divergente

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \int \nabla \cdot \vec{E} dV \quad \Longrightarrow \quad \int \nabla \cdot \vec{E} dV = \int \frac{\rho dV}{\epsilon}$$

Eliminado as integrais, temos:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Da mesma forma

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Agora, a partir do teorema de Stokes:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{a} \quad \int \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{a} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{a}$$

De acordo com a definição de fluxo magnético,

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{a}$$

Portanto,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Para a última equação, também pelo teorema de Stokes:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int \nabla \times \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad \int \nabla \times \vec{B} \cdot d\vec{a} = \mu\epsilon \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{a} + \mu \int \vec{J} \cdot d\vec{a}$$

Onde foi usada a relação entre a corrente “i” e a densidade de corrente \vec{J} , medida em A/m²:

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{a}$$

e $\phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{a}$ para o fluxo do campo elétrico.

Reunindo todas as equações, temos as equações de Maxwell na forma diferencial:

$$1) \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$2) \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$3) \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$4) \nabla \times \vec{B} = \mu\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\vec{J}$$

Podemos trabalhar um pouco com as equações de Maxwell e deduzir a equação da onda no espaço livre:

A partir da terceira equação:

$\nabla_x \nabla_x \vec{E} = -\nabla_x \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla_x \vec{B}$ O rotacional de \vec{B} é dado pela equação 4, mas com $\vec{J} = 0$, já que no vácuo não há corrente elétrica, então:

$$\nabla_x \nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Usando a identidade vetorial $\nabla_x \nabla_x \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$, e o fato de que $\rho = 0$ ($\nabla \cdot \vec{E} = 0$):

$$-\nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \Rightarrow \nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

Sabendo que $C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \implies \nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ Equação da onda no espaço livre.

Dada a natureza eletromagnética da luz, podemos escrever as equações que representam os campos elétrico e magnético componentes:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= E_m \text{sen}(\vec{K} \cdot \vec{x} - \omega t) \hat{j} \\ \vec{B} &= B_m \text{sen}(\vec{K} \cdot \vec{x} - \omega t) \hat{k} \end{aligned}$$

Onde E_m e B_m são as amplitudes dos campos que obedecem a seguinte relação:

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad \text{velocidade da luz}$$

Sendo os campos \vec{E} e \vec{B} perpendiculares entre si e à direção de propagação (no espaço livre), temos que a luz é uma onda transversal e eletromagnética, pois os campos oscilam transversalmente à direção de propagação da onda.

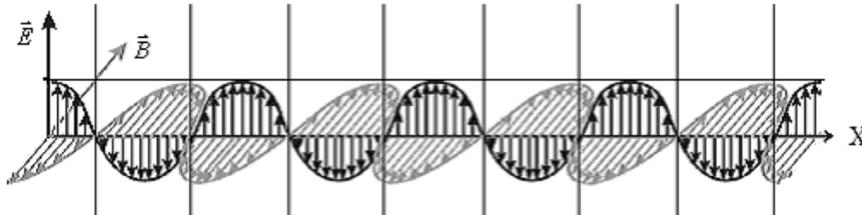
Polarização

Na década de 30, o físico americano Edwin Land conseguiu reproduzir o efeito da polarização com a "luz visível". Land foi o criador do filtro polarizador para luz, o "Polaróide", barato e eficiente, e inventou uma câmera fotográfica de revelação instantânea que teve enorme sucesso, garantindo uma fortuna com suas pesquisas. Ainda hoje, a Polaroid Corporation é uma grande indústria. Mas, além disso, Land continuou a ser um excelente pesquisador, com contribuições valiosas para o entendimento da visão das cores...

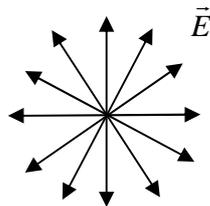
Existem alguns tipos de polarização de ondas eletromagnéticas, a linear, circular e elíptica, porém, vamos analisar somente o primeiro tipo.

A polarização linear consiste em fazer o campo elétrico oscilar em uma única direção e, conseqüentemente, o campo magnético também. Como o campo elétrico, no vácuo, é perpendicular à direção de propagação, este define um plano no espaço, chamado *plano de vibração*, enquanto a onda se propaga. Assim, temos dois planos perpendiculares entre si: um contendo o campo elétrico e outro o magnético.

A figura abaixo representa os campos elétrico e magnético de uma onda plana monocromática, que se propaga na direção do eixo X. O plano que contém o campo elétrico coincide com o da página:

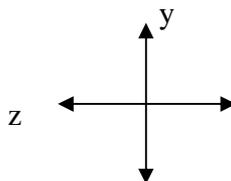


Quando estudamos o efeito de polarização, comumente considerarmos apenas o campo elétrico, já que a maioria dos detectores de radiação é mais sensível a este campo. Uma antena dipolar transmissora é um exemplo de radiação eletromagnética linearmente polarizada, pois é gerada pelo movimento oscilatório das cargas ao longo da antena, gerando a onda com o campo elétrico oscilando paralelo ao eixo da antena. Nos casos de fontes de luz, como o Sol ou uma lâmpada de incandescência, por exemplo, a luz emitida em uma dada direção consiste em muitas ondas independentes, com seus campos elétricos orientados em planos de vibração aleatórios, em torno da direção de propagação. Nesse caso, a luz é dita não-polarizada.

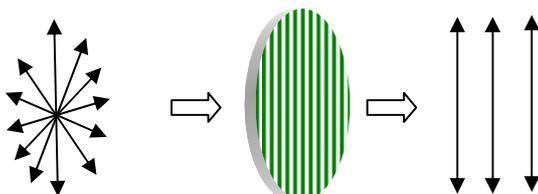


Representação de luz não-polarizada.

Teoricamente, podemos decompor cada campo elétrico da figura acima em componentes y e z e determinar o campo resultante na direção y e na direção z. Com isso, podemos transformar matematicamente a luz não-polarizada em duas ondas planas superpostas:



Podemos transformar a luz originalmente não-polarizada em luz polarizada fazendo-a passar por uma placa polarizadora (placa polaróide). No plano da placa existe uma direção característica chamada de *direção de polarização*, indicadas pelas linhas paralelas:



Quando a luz passa por uma placa polarizadora, a intensidade transmitida é a metade da intensidade inicial. Nesse caso, são representadas as linhas de transmissão.

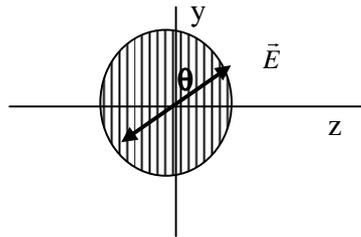
A direção de polarização da placa é estabelecida durante o processo de fabricação, quando certas moléculas de cadeia longa são inseridas em uma placa de plástico flexível e estirando-a de modo que as moléculas se alinhem paralelamente umas as outras. Tal placa absorve a radiação polarizada na direção paralela às moléculas longas.



A direção das linhas de absorção do filtro polarizador, nesse caso, é horizontal. A placa só permite passar as componentes perpendiculares do campo \vec{E} a essa direção.

A intensidade transmitida varia de acordo com a seguinte expressão:

$$I = I_m \cos^2 \theta$$



Lei de Malus

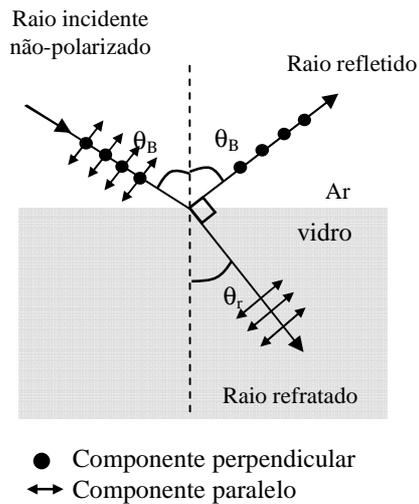
Onde I_m é o máximo de intensidade e I a intensidade transmitida

No caso de haver uma combinação de placas polarizadoras:

$$I = I_m \prod_{i=1}^n \cos^2 \theta_i$$

A polarização da luz também pode ocorrer através da reflexão em uma placa de vidro ou outro material dielétrico, para um determinado ângulo crítico. Tal evento foi descoberto por acaso, em 1809, pelo estudioso Etienne Louis Malus, que deu nome à equação anterior.

A figura abaixo mostra um raio de luz não polarizada incidindo em uma superfície de vidro. Os vetores do campo elétrico da luz podem ser decompostos em componentes perpendiculares ao plano de incidência (plano da página), representados por pontos, e por componentes paralelos, pertencentes ao plano de incidência, representados por setas.



Para o vidro e outros materiais dielétricos, existe um ângulo de incidência particular chamado de ângulo de Brewster (θ_B), para o qual não há reflexão das componentes paralelas. Isso significa que a luz refletida no vidro, sob esse ângulo, é totalmente polarizada. O ângulo de Brewster (θ_B) é tal que o ângulo entre os raios refletido e refratado corresponde a $\pi/2$, veja figura ao lado. Maiores detalhes sobre a Lei de Brewster serão abordados em estudos posteriores. Se usarmos um filtro polarizador com as linhas de transmissão (direção de polarização) perpendiculares ao campo elétrico, poderemos bloquear totalmente o raio refletido.

Algumas aplicações para os filtros polarizadores:

- Protetores visuais (óculos polaróide);
- Fluorescência polarizada: técnica experimental com aplicações na farmacologia;
- Câmeras fotográficas;
- Vidros especiais para a redução da intensidade da luz;

O COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO DA LUZ¹⁹

Interferência

Um dos efeitos característicos das ondas é a interferência. Por isso, tal efeito pode ser uma das comprovações mais persuasivas do comportamento ondulatório da luz. Quando duas ondas (ou mais) são combinadas, podem sofrer *interferência construtiva*,



Figura 1: Representação de duas ondas idênticas interferindo construtivamente.

totalmente *destrutiva*,

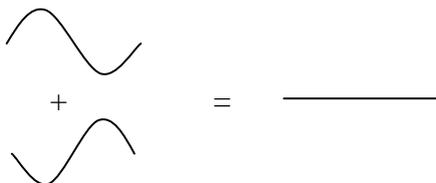


Figura 2: Representação de duas ondas idênticas, defasadas, interferindo destrutivamente.

ou uma situação intermediária

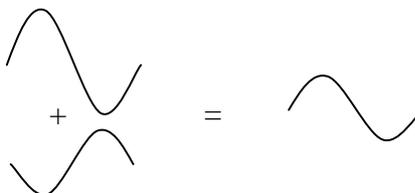
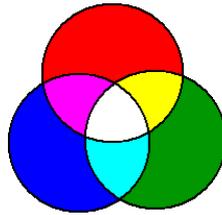


Figura 3: Representação de duas ondas defasadas e com amplitudes diferentes interferindo.

O resultado, que pode ser visualizado em um anteparo, são franjas de interferência mais claras, totalmente escuras ou uma redução da intensidade luminosa, respectivamente.

Em geral, a onda resultante pode ter, não apenas a amplitude modificada, mas o *comprimento de onda*, a *freqüência* e a sua *fase*, em relação às ondas componentes. Isso pode ser idealizado a partir da combinação de ondas, por exemplo, combinando a luz vermelha e a luz azul, que resulta na luz magenta:

¹⁹ Texto elaborado com base no livro “Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna. Halliday, Resnick e Walker. 4^a edição”, e no livro “Introduction to modern optics: Grant R. Fowles.



vermelha + verde = amarela
azul + verde = ciano

Figura 4: Combinação de luzes de diferentes frequências.

Considere duas ondas idênticas, por simplicidade, interferindo, com uma diferença de fase de $2m\pi$ ($m = 0,1,2\dots$), correspondente a um número inteiro de “ λ ”. Nesse caso, a interferência é construtiva, pois as cristas das ondas coincidem. Se a diferença for de $(m+1/2)\lambda$, um número ímpar de meios comprimentos de onda, o que corresponde a uma diferença de fase igual a $(2m + 1)\pi$ (um número ímpar de π), a interferência é destrutiva.

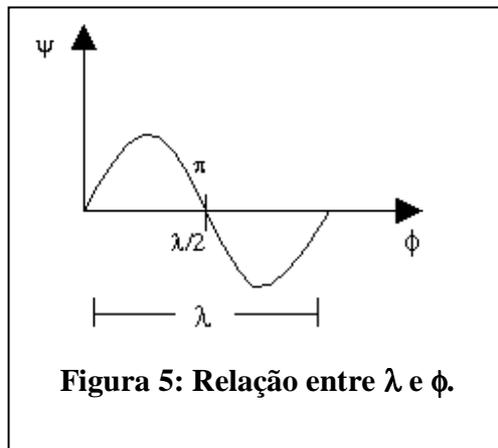


Figura 5: Relação entre λ e ϕ .

A figura ao lado apenas representa a relação entre λ e ϕ . A onda se propaga como uma função $\text{sen}\phi$. Para meio ciclo ($\phi = \pi$), há uma correspondência de meio comprimento de onda.

Thomas Young (1801), físico e médico inglês, demonstrou de forma convincente a natureza ondulatória da luz, utilizando duas fontes *coerentes* produzidas a partir de uma fonte iluminando duas fendas (figura 1). Dessa maneira, Young observou os padrões de interferência no anteparo colocado à frente das duas fontes:

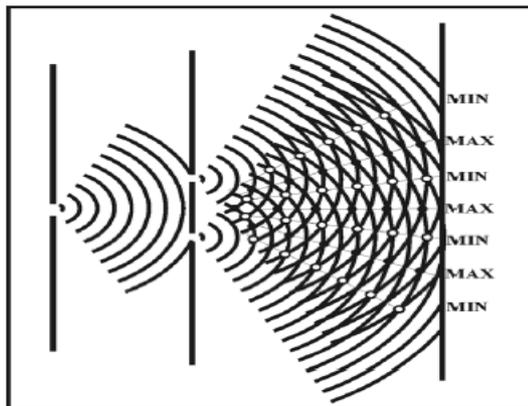


Fig. 1: Representação dos máximos e mínimos de interferência no experimento de Young

A coerência entre duas ondas significa que a diferença de fase entre elas é uma constante no tempo. Se a diferença de fase não for uma constante no tempo, varia aleatoriamente, nenhuma figura de interferência pode ser observada, pois a interferência varia de construtiva em um dado momento para destrutiva no momento seguinte, tornando o efeito imperceptível. Dizemos então que as duas ondas são totalmente incoerentes.

Na figura 6-a está representada uma onda plana que incide da esquerda para a direita sobre duas aberturas, atingindo o anteparo Σ . Para que tal situação seja analisada, é necessário que um outro efeito ondulatório seja considerado, a *difração*. Trata-se, basicamente, de um efeito no qual uma onda contorna barreiras ou sofre modificação na sua frente de onda ao atravessar aberturas. No caso da figura abaixo, a onda plana difrata pelas aberturas e deixa de ser plana ao atravessá-las, tornando-se, aproximadamente, esférica. Como são duas aberturas, podem ser tratadas como duas fontes de ondas, as quais podem interferir entre si:

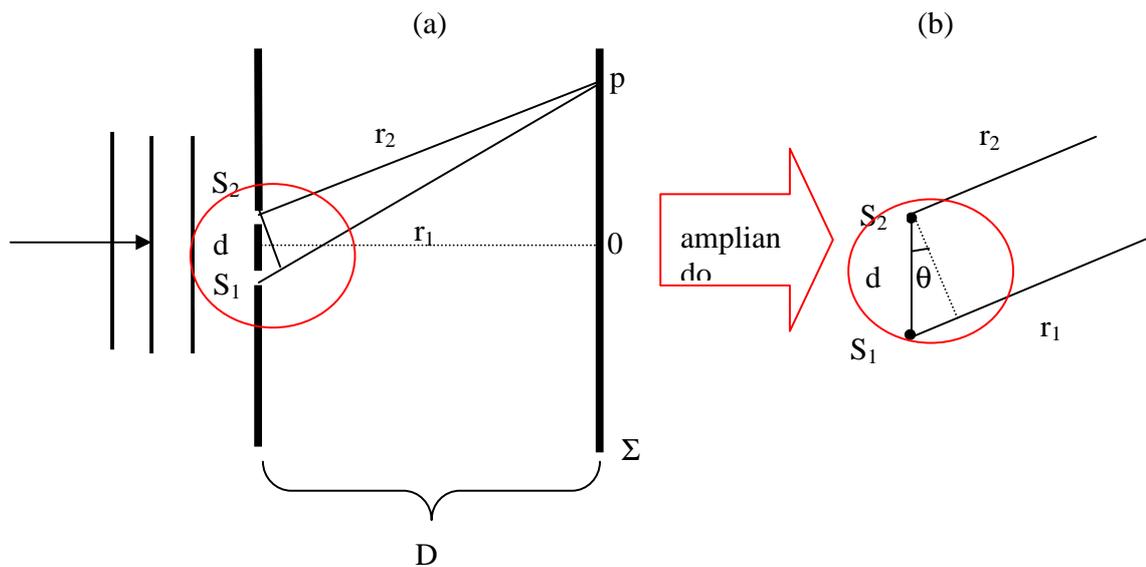


Figura 6: (a) Interferência a partir de uma onda plana difratada. (b) Aproximação para os raios r_1 e r_2 .

Considerando $D \gg d$, pode-se tratar os raios r_1 e r_2 como paralelos, conforme representado na figura 6-b. Com isso, a diferença de percurso entre os dois raios é $d \sin \theta$.

Para a localização dos máximos de interferência, em uma posição p no anteparo Σ , basta igualar essa diferença ($d \sin \theta$) a um número inteiro de comprimentos de onda:

$$d \sin \theta = m \lambda \quad \text{pois a diferença de um número inteiro de comprimento de onda deixa as ondas em fase, e a interferência é construtiva.}$$

No caso dos mínimos, igualamos a diferença de caminho a um número ímpar de meio comprimento de onda:

$$d \sin \theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Dessa forma, as duas ondas estão defasadas de π , havendo interferência totalmente destrutiva.

Estas duas equações fornecem as posições dos máximos e mínimos de interferência tanto acima como abaixo do máximo central em “0”, representado na figura 6-(a).

O fundamento teórico para a interferência de ondas eletromagnéticas é essencialmente baseado no princípio da superposição linear dos campos eletromagnéticos. De acordo com esse princípio, o campo elétrico resultante em um determinado ponto do espaço vazio é dado pela soma vetorial de vários campos elétricos no mesmo local, produzidos por diferentes fontes, ou seja:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Devido a natureza eletromagnética da luz, se as ondas que interferem forem polarizadas, a visualização da figura de interferência também dependerá da direção de polarização dos campos eletromagnéticos. Vamos considerar, por exemplo, duas ondas planas polarizadas de mesma frequência ω . Os campos elétricos podem ser representados por:

$$\vec{E}_{(1)} = \vec{E}_1 e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_1)}$$

Onde ϕ_1 e ϕ_2 são introduzidos para representar qualquer diferença de fase entre as duas ondas.

$$\vec{E}_{(2)} = \vec{E}_2 e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_2)}$$

Sabendo que a intensidade é proporcional ao quadrado do módulo do campo elétrico:

$$I \propto |\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^*$$

Desenvolvendo o cálculo, encontramos:

$$\begin{aligned} |\vec{E}|^2 &= \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \left[e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2)} + e^{-i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2)} \right] = \\ &= |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2) \end{aligned}$$

O termo $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2)$ é chamado *termo de interferência*, é o responsável pela visualização das franjas de interferência. A diferença de fase é dada por $\phi_1 - \phi_2$, se as ondas forem totalmente incoerentes, essa quantidade varia aleatoriamente com o tempo e o valor médio do cosseno é zero. Se as ondas forem polarizadas, com direções perpendiculares entre os campos elétricos, o produto escalar $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$ resulta nulo. Dessa forma, a visualização da figura de interferência também dependerá da polarização das ondas (Fowles, 1989)²⁰.

Mudança de meio, Índice de refração e interferência em filmes finos

O índice de refração pode ser definido para cada meio como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio:

²⁰ Fowles, G. R. Introduction to Modern Optics.

$$n = c/v \quad \text{índice de refração.}$$

Dessa forma, o comprimento de onda em um meio (λ_n) é dado por λ/n :

$$\lambda_n = v \cdot T$$

onde “T” é o período de oscilação e “v” a velocidade de propagação no meio. E “cT” é o comprimento de onda (λ) no vácuo.

➔
$$\lambda_n = v \cdot T = (cT)/n = \lambda/n$$

A onda parece sofrer uma redução no seu comprimento de onda, conseqüentemente, uma redução na sua velocidade de propagação para “c/n”. Na verdade, ao analisarmos um pouco sobre a origem do índice de refração, quando uma onda eletromagnética muda de meio de propagação, passa a viajar em um meio material, por exemplo, no vidro, ocorre interação entre a onda e o meio de propagação. Os elétrons dos átomos do vidro tendem a oscilar com frequência da luz, mas com amplitudes insuficientes para provocar “colisões” entre os átomos vizinhos, havendo transferência desprezível de energia para o vidro sob forma de calor. Os elétrons oscilantes reemitem a luz incidente de átomo para átomo, existindo um pequeno tempo de atraso entre a absorção e a reemissão da luz (Hewitt, 2002)²¹. Isso faz com que a luz sofra uma redução aparente na sua velocidade de propagação para “c/n”. Quando a luz emerge na outra face do vidro, esse processo deixa de existir e a luz passa a viajar com velocidade “c” novamente (supondo $n = 1$ fora do vidro). Para cada componente da luz branca, haverá uma velocidade de propagação diferente, e a luz branca pode ser separada em suas cores componentes. Esse efeito de separação da luz branca é denominado *dispersão cromática*. Em geral, o índice de refração é maior para comprimentos de onda menores. Por isso, a luz azul sofre um desvio maior do que a vermelha, por exemplo. Considere a figura abaixo, que apresenta dois meios de índices de refração n_1 e n_2 e mesmo comprimento L:

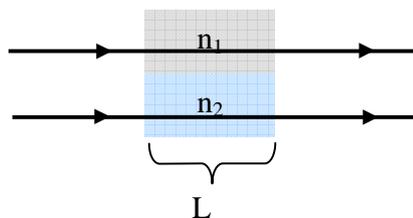


Figura 7: Dois raios de luz incidindo em dois meios com índices de refração

As duas ondas luminosas, com mesmo comprimento de onda, estão inicialmente em fase, representadas pelos raios incidentes à esquerda, emergem dos meios no lado direito. Para que interfiram destrutivamente, a diferença de caminho óptico deve ser igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$):

os comprimentos de onda em cada meio são:

$$\lambda_{n1} = \lambda/n_1 \text{ e } \lambda_{n2} = \lambda/n_2$$

²¹ Mais detalhes sobre a origem do índice de refração pode ser obtido em: Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. Lectures on Physics. E Hewitt G. P. Física conceitual.

Agora, precisamos descobrir quantos comprimentos de onda “cabem” na largura L , para ambos os meios:

A partir das equações para λ_{n1} e λ_{n2}

$$N_1 = L/\lambda_{n1} = Ln_1/\lambda \quad \text{e} \quad N_2 = L/\lambda_{n2} = Ln_2/\lambda$$

Para determinar a diferença de fase das duas ondas, basta calcular o módulo da diferença entre N_1 e N_2 :

$$|N_1 - N_2| = \left| \frac{Ln_1}{\lambda} - \frac{Ln_2}{\lambda} \right| = \frac{L}{\lambda} |n_1 - n_2|$$

Se tal diferença corresponder $(2m+1).0,5$, com $m = 0,1,2,3,\dots$, a diferença de fase corresponderá a meio comprimento de onda e a interferência será totalmente destrutiva. Seja, por exemplo, $m= 25$:

$(2.25+1).0,5 = 25,5$ São 25,5 comprimentos de onda. Isso indica que em um dos meios houve uma defasegem entre as ondas. Como os números inteiros de “ λ ” deixam as ondas em fase, interessa apenas o 0,5 comprimento de onda (o que dá meio ciclo de oscilação, $\phi = \pi$). Portanto, a interferência é destrutiva.

Com o mesmo raciocínio, se a diferença corresponder a “ m ” comprimentos de onda ($m = 0,1,2,3,\dots$), a interferência será construtiva. Para casos intermediários, teremos diferenças significativas nos intervalos abertos

$$0 > |N_1 - N_2| < 0,5$$

ou

$$0,5 > |N_1 - N_2| < 1,0$$

Nesses casos, a interferência é parcial. Para um valor de 0,6, o ponto de intersecção das duas ondas fica fracamente iluminado, próximo à interferência totalmente destrutiva (diferença de 0,5).

Pode-se fazer uma analogia com as ondas mecânicas para compreender a propagação da luz quando ocorre mudança de meio. Considere uma onda produzida em uma corda conforme a figura abaixo:

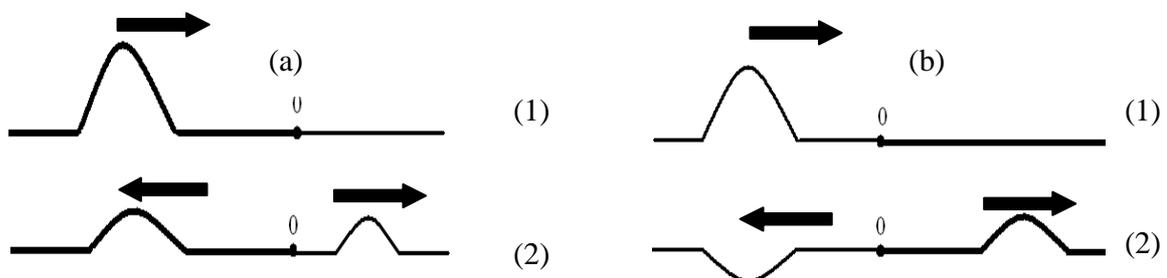


Figura 8: Onda produzida em uma corda.

No ponto “0” há uma mudança de meio de propagação. A onda viajante chega em um meio menos denso (1), figura 8-(a). Parte da onda é refletida e parte é transmitida, sem ocorrer mudança de fase (2). No caso contrário, a onda encontra um meio mais denso, na reflexão há uma mudança de fase de π rad, figura 8-(b).

Algo semelhante ocorre com a luz ao mudar de meio de propagação. Quando a onda propagante encontra uma interface entre dois meios com *índices de refração* diferentes, pode sofrer uma mudança na fase de oscilação. Essa mudança de fase tem implicações interessantes quando a interferência em filmes finos é estudada. As cores que são observadas em bolhas de sabão, em manchas de óleo, por exemplo, estão relacionadas a tal efeito. A figura abaixo representa um filme fino com índice de refração n_2 , no qual a luz incide à esquerda, mergulhado em um meio de índice de refração n_1 :

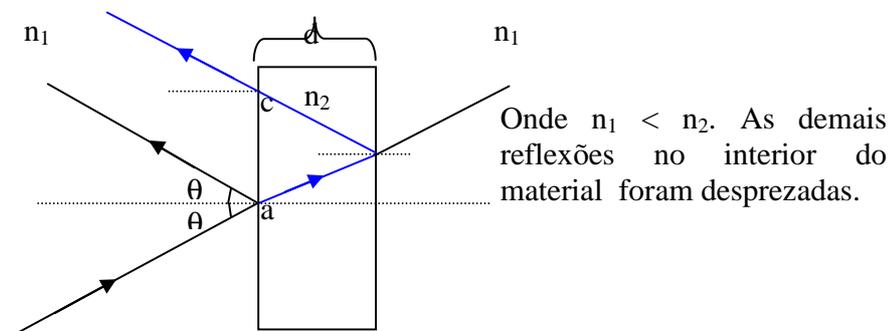
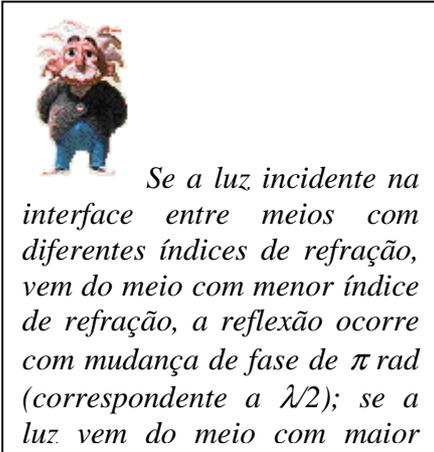


Figura 9: Representação de luz incidindo em um filme fino.

O raio incidente (preto) é parcialmente refletido sobre a superfície, onde encontra um meio mais denso, sofrendo uma mudança de fase de π rad, pois $n_1 < n_2$, e parte refratado (azul), que encontra a segunda interface, também sendo parcialmente refletido e refratado, mas não há mudança de fase, pois $n_2 > n_1$. Quando o raio azul retorna à primeira interface, novamente não há troca de fase. O resultado é que a onda incidente se divide em parte refletida e parte refratada, representadas pelos raios preto e azul, podendo haver diferença de fase igual a π rad ao emergirem da primeira superfície. Dessa forma, se os raios r_1 e r_2 chegam em fase ao olho do observador, eles produzem um máximo de interferência e a região “ac” parece clara ao observador. Se os mesmos raios chegam com fases opostas, produzem um mínimo de interferência e a região “ac” parece mínima ao observador, apesar de estar iluminada. Quando é a luz branca que incide em um filme fino, podemos observar as cores que emergem devido às interferências destrutivas e construtivas das ondas de diversas frequências. Obviamente, a espessura do filme deve ser tal que possa produzir o fenômeno (da ordem de “ λ ”). Ademais, é possível ocorrer interferência totalmente destrutiva de toda luz incidente, e, nesse caso, não podemos enxergar a camada do filme fino. Um exemplo disso é a película de água com sabão que pode ser formada em uma argola metálica. Parte da camada escorre para a base da argola, formando uma camada mais espessa. Na parte superior, forma-se uma camada tão fina que a luz refletida sofre interferência destrutiva, tornando o filme escuro. Franjas de interferência coloridas decoram



o resto do filme, mas, aos poucos, a força da gravidade faz com que o líquido escorra, tornando o filme espesso demais para que o fenômeno seja observado com clareza (Halliday, pg 73).

Para determinarmos se a interferência será destrutiva ou construtiva em filmes finos, consideramos a trajetória do raio refratado (raio azul na figura 9). Dado que a espessura do filme é “d”, a distância total para raio azul é, aproximadamente, “2d”.

A interferência será destrutiva, no caso da figura 9, se:

$$2d = m\lambda_{n_2} \quad 2n_2d = m\lambda$$

e construtiva

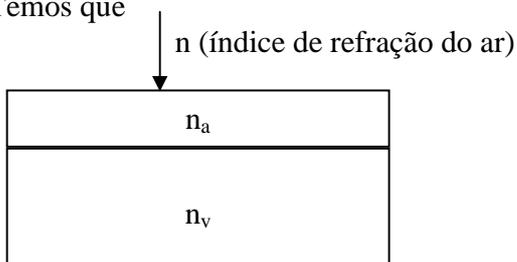
$$2n_2d = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

Pois, para o raio refletido na primeira superfície (preto), houve inversão de fase, mas o refratado (azul) não sofreu mudança de fase ao refletir na segunda superfície.

Dessa forma, pode-se combinar meios com diferentes índices de refração para que se produza interferência da luz, tornando possível, por exemplo, reduzir a reflexão da luz incidente.

Exemplo: Um filme fino de acetona ($n_a = 1,25$) cobre uma placa grossa de vidro ($n_v = 1,50$). O conjunto é exposta a luz branca, com incidência perpendicular. Uma interferência destrutiva da onda refletida é observada para um comprimento de onda de 600 nm e uma interferência construtiva é observada para 700 nm. Determine a espessura do filme de acetona. (Problema 61 do Halliday)

Temos que



$n < n_a < n_v$ Na primeira reflexão, há uma mudança de fase. Na segunda também. Então, com as ondas em fase, para que ocorra interferência destrutiva da onda com $\lambda = 600$ nm:

$$2n_a d = (m + \frac{1}{2})\lambda_{600}$$

Para $\lambda = 700$ nm a interferência é construtiva, então:

$$2n_a d = m\lambda_{700}$$

O valor para “d” deve ser satisfeito para ambas as equações, para tanto, precisamos descobrir o valor de “m”: dividindo uma equação pela outra

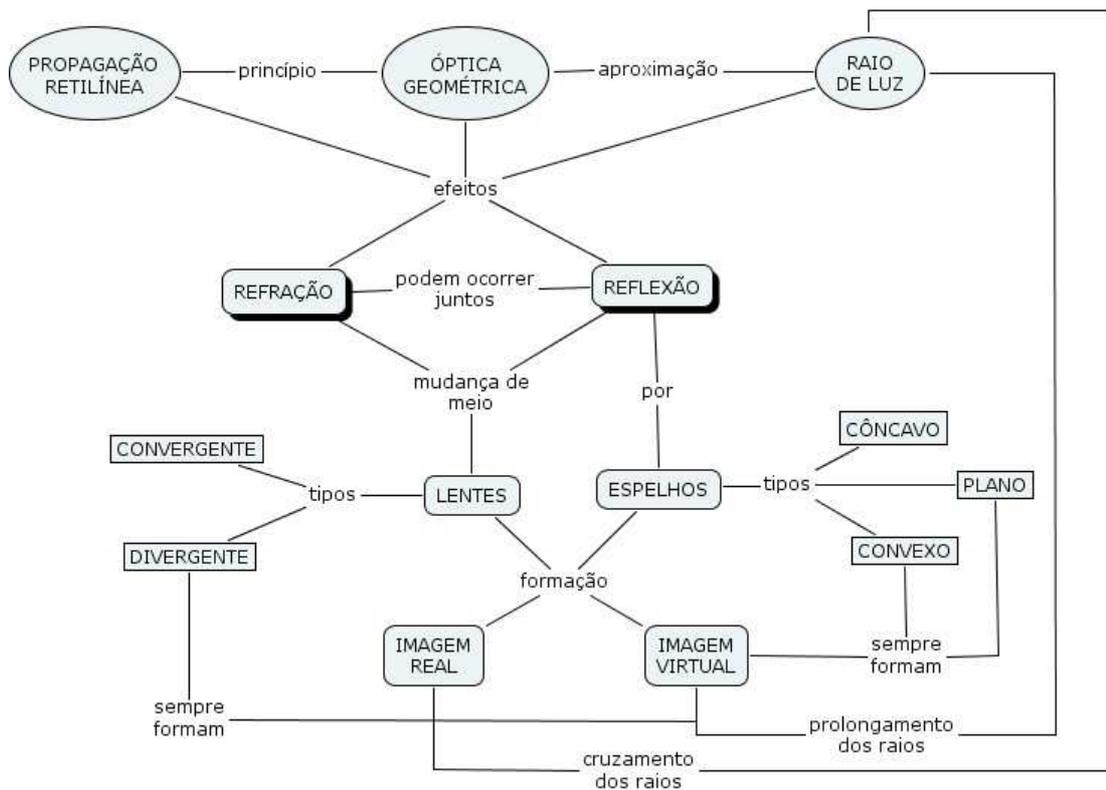
$$m\lambda_{700} = (m + \frac{1}{2})\lambda_{600} \Rightarrow m = \frac{\lambda_{600}}{2(\lambda_{700} - \lambda_{600})} = 3$$

Substituindo em uma das equações: $d = \frac{3\lambda_{700}}{2n_a} = 840nm$

ATIVIDADE SUGERIDA:

Elabore um mapa conceitual sobre os tópicos *Interferência e difração*, mas adicione os conceitos de fase, comprimento de onda e índice de refração, procurando estabelecer as possíveis relações entre esses conceitos e com os demais que achar interessante apresentar.

OBS: Entregue o mapa conceitual para o professor da disciplina, na próxima semana, pois assim teremos chance de avaliá-lo e discuti-lo, para a atribuição dos pontos na última área.



Um mapa conceitual para Óptica Geométrica. (Voltaire, 2006)

Este mapa conceitual foi apresentado aos alunos com o intuito de incentivá-los a estudar os conceitos da Óptica e de evidenciar a importância da explicação de um mapa conceitual.

PROBLEMAS RESOLVIDOS E COMENTADOS (Halliday – cap. 38 - 4ª. edição)

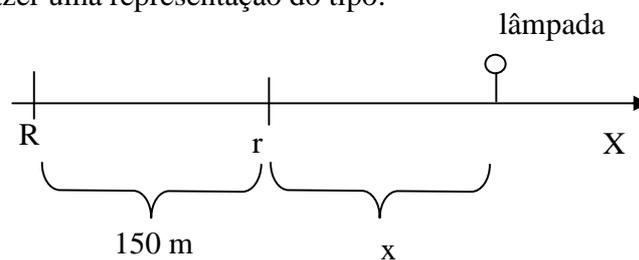
25) Você caminha 150 m em direção a uma lâmpada de rua e nota que a intensidade passa a ser uma vez e meia maior do que a intensidade na sua posição inicial. A que distância da lâmpada você se encontrava inicialmente ? (Suponha que a lâmpada irradie uniformemente em todas as direções.)

Conhecemos:

Distância percorrida: $d = 150$ m

Intensidade final: $I_f = 1,5I_0$ ①

Podemos fazer uma representação do tipo:



De “R” (distância inicial, até a lâmpada) até a posição “r” são 150 m. Se a lâmpada irradia uniformemente para todos os lados, podemos usar a seguinte relação para a intensidade:

$$I_0 = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Onde “P” é a potência da lâmpada e “ $4\pi R^2$ ” é a área de uma esfera, já que a irradiação é tridimensional e uniforme.

Do problema, temos, então:

$$I_f = 1,5I_0 = 1,5 \cdot \frac{P}{4\pi R^2}, \text{ mas a expressão para a intensidade final é } I_f = \frac{P}{4\pi x^2}, \text{ pois}$$

estamos, na posição “r”, a uma distância “x” da lâmpada. De acordo com a figura, a distância “x” pode ser escrita como

$$x = R - d$$

Com isso:

$$\frac{P}{4\pi(R-d)^2} = 1,5 \cdot \frac{P}{4\pi R^2}$$

$$\text{Resolvendo para R, temos: } R^2 - 6Rd + 3d^2 = 0$$

Assim, $R = 83$ m, valor para satisfazer a relação ①

27) A luz solar atinge a alta atmosfera terrestre com uma intensidade de $1,40 \text{ KW/m}^2$. Determinar E_m e B_m para a luz solar, supondo que ela seja uma onda plana.

Da expressão que relaciona o vetor de Poynting e a intensidade de uma onda plana, temos:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{c\mu_0} E_{rms}^2 \quad \text{mas} \quad E_m = \sqrt{2} E_{rms}$$

então

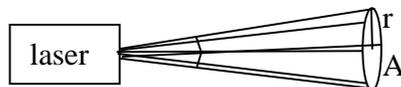
$$I = \frac{1}{2c\mu_0} E_m^2 \quad E_m = \sqrt{2Ic\mu_0} = 1,03 \text{KV} / m$$

Considerando que E_m e B_m se relacionam com a velocidade da luz:

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad B_m = \sqrt{\frac{2I\mu_0}{c}} = 3,43 \mu T$$

31) Um laser de hélio-neon, irradiando em $632,8 \text{ nm}$, possui uma potência de saída de $3,0 \text{ mW}$ e um ângulo completo de divergência do feixe igual a $0,17 \text{ mrad}$. (a) Qual é a intensidade do feixe a 40 m do laser ? (b) Qual é a potência de uma fonte puntiforme que fornece a mesma intensidade para a mesma distância ?

(a) Se há um ângulo de divergência, significa que o feixe vai se espalhando a medida que se distancia da fonte:



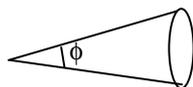
O ângulo de divergência faz com que o feixe descreva um cone. A uma distância de 40 m , o feixe ilumina uma área "A", correspondente a área da base do cone. Como é a área de um círculo de raio "r":

$$A = \pi r^2$$

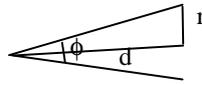
Dessa forma, a intensidade do feixe a uma distância "d" do laser é dada por:

$$I = P/A$$

Para calcularmos a área, precisamos descobrir o valor do raio "r".



Vamos considerar apenas dois raios, superior e inferior, com um ângulo "phi" entre eles. Se estes raios forem "girados", produziremos um cone e o ângulo "phi" passa a ser um ângulo sólido. Considerando os dois raios e traçando uma reta entre eles, podemos formar um triângulo retângulo, no qual um dos lados coincide com o raio "r" que procuramos.



Assim,

$$r = d \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Substituindo na expressão para a intensidade:

$$I = \frac{P}{\pi d^2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} = 83 \frac{W}{m^2}$$

(b) A potência é

$$P = I_a = 4\pi I d^2 = 1,7 \text{ MW}$$

Se a fonte é puntiforme, sua irradiação é uniforme em todas as direções, então a área “a” é a de uma esfera de raio “d”.

33) Durante um teste, um sistema de vigilância com radar da OTAN, operando a 12 GHz com potência de 180 KW, tenta detectar, a uma distância de 90 Km, um avião “inimigo” que se aproxima. Suponha que o feixe de radar é emitido uniformemente através de um hemisfério. (a) Qual é a intensidade do feixe no local do avião ? O avião reflete as ondas do radar como se a área de sua seção transversal fosse somente de 0,22 m². (b) Qual é a potência do feixe refletido pelo avião ? Suponha que o feixe é refletido uniformemente através de um hemisfério. Retornando ao local da radiação, quais são (c) a intensidade, (d) o valor máximo do campo elétrico, e (e) o valor eficaz do campo magnético, do feixe refletido pelo radar ?

Primeiramente, vamos relacionar as informações do problema:

$$P = 180 \text{ KW}$$

$$D = 90 \text{ Km}$$

$$A = 0,22 \text{ m}^2$$

Emissão uniforme através de um hemisfério.

(a) Para determinarmos a intensidade no local do avião:

$$I = \frac{P}{A'} \quad \text{Onde “A'” é a área de um hemisfério: } A' = \frac{1}{2} 4\pi D^2$$

$$\text{Então: } I = \frac{P}{2\pi D^2} = 3,5 \frac{\mu W}{m^2}$$

(b) A potência do feixe refletido pelo avião, relaciona-se com a sua área da seção transversal “A” e a intensidade que nela chega, calculada em (a):

$$P_a = IA = 0,78 \mu W$$

(c) A intensidade “I” que retorna ao local da radiação é dada por:

$I' = \frac{P_a}{A'} = 1,5 \times 10^{-7} \frac{W}{m^2}$ Onde “Pa” é a potência do feixe refletido pelo avião, calculado em (b) e A’ a área do hemisfério.

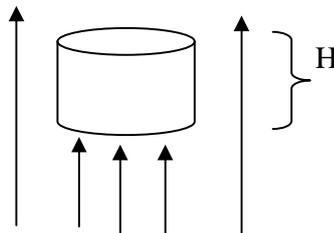
$$(d) I' = \frac{1}{2\mu_0 c} E_m^2 \longrightarrow E_m = \sqrt{2I' \mu_0 c} = 110n \frac{V}{m}$$

$$(e) B_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_m \quad e \quad B_m = \frac{E_m}{c}$$

Com isso

$$B_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}c} = 2,5 \times 10^{-16} T = 0,25 fT$$

41) Um feixe de laser com potência “P_l” igual a 4,60 W e diâmetro de 2,60 mm está apontando para uma face circular (de diâmetro d < 2,60 mm) de um cilindro perfeitamente refletor, que se encontra suspenso no ar por ação da pressão de radiação exercida pelo feixe. A massa específica do cilindro é 1,20 g/cm³. Qual é a altura “H” do cilindro ?



Se o cilindro está suspenso, a força exercida pelo feixe do laser deve se igualar à força peso “P”:

$$F = P$$

$$\text{Onde } P = Mg = Vmg = AHmg$$

A massa “M” do cilindro é igual ao produto do seu volume pela sua massa específica “m”.

Como o cilindro é perfeitamente refletor: $F = (2IA)/c$.

Com “A” a área da base do cilindro e “g” a aceleração da gravidade.

Com $I = P/A$, igualando as expressões:

$$\frac{2PA}{Ac} = AHmg$$

$$\text{Onde a área da base do cilindro é } A = \pi(d/2)^2$$

Resolvendo para H, temos:

$$H = \frac{8P_l}{\pi d^2 mgc} = 491nm$$

45) Uma pequena astronave cuja massa, incluindo os tripulantes, é de $1,5 \times 10^3$ Kg, desloca-se no espaço cósmico onde não existe nenhum campo gravitacional. Se o astronauta acender um feixe de laser de 10 KW, que velocidade poderá atingir, após um dia, devido à quantidade de movimento transportada pelo feixe ?

A quantidade de energia emitida pelo laser durante um dia é dada por

$$\Delta U = P \cdot t \quad \text{onde "P" é a potência do laser e "t" o tempo (um dia)}$$

Como não há campo gravitacional, a única força que temos é devido à radiação do laser. Então, podemos escrever a expressão para a força:

$$Ma = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \text{Como } \Delta p \text{ (variação de momentum) se relaciona com a energia pela}$$

equação $\Delta p = \frac{\Delta U}{c}$ Considerando absorção total. Δt é a variação do tempo, nesse caso, um dia. Na equação para a força:

$$Ma = \frac{\Delta U}{Tc} = \frac{P}{c} \longrightarrow a = \frac{P}{Mc} \quad \text{Agora que já conhecemos com que aceleração a}$$

astronave viaja, após um dia, a velocidade alcançada é:

$$V = aT = \frac{PT}{Mc} = 0,0019 \frac{m}{s} = 1,9 \frac{mm}{s}$$

47) Uma partícula no sistema solar está sob a influência combinada da atração gravitacional de radiação devida aos raios solares. Suponha que a partícula seja uma esfera de massa específica $1,0 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ e que toda luz incidente seja absorvida. (a) Mostrar que, se o raio da partícula for menor que um certo raio crítico r , a partícula será soprada para fora do sistema solar. (b) Calcule r .

(a) Temos no problema duas forças envolvidas: a força gravitacional e a da radiação solar.

$$F_g = G \frac{M_s m}{R^2} \quad (\text{Força gravitacional}) \quad F_r = \frac{IA}{c} \quad (\text{força da radiação, para a absorção total}).$$

Para que a partícula permaneça no sistema, devemos igualar as forças, já que a gravitacional é atrativa. Para mantermos o equilíbrio do sistema, então:

$$F_g = F_r \quad G \frac{M_s m}{R^2} = \frac{IA}{c} \quad \text{A massa "m" da partícula pode ser determinada}$$

por: $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot m_e$, o produto do volume e a massa específica m_e . A intensidade "I" da

radiação solar é: $I = \frac{P_s}{4\pi R^2}$ Onde "P_s" é a potência solar e "R" é a distância

do Sol até uma determinada posição da partícula. Com isso, substituímos na igualdade das expressões das forças e obtemos:

$$\frac{4}{3R^2} \pi r^3 G m_e M_s = \frac{P_s \pi r^2}{4\pi R^2 c} \rightarrow r_c = \frac{3P_s}{16cG\pi m_e M_s}$$

Se "r" for menor do que "r_c" ao lado, a força gravitacional torna-se insuficiente para manter a partícula em equilíbrio; a força da radiação solar expulsa a partícula para fora do sistema.

(b) Para calcularmos "r", basta colocar os valores na equação acima:

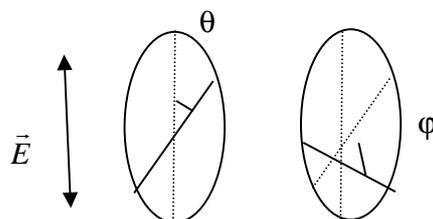
$$r = 580 \text{ nm} \quad \text{Onde} \quad G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$$

$$M_s = 1,99 \times 10^{30} \text{ Kg}$$

$$P_s = 3,90 \times 10^{26} \text{ W}$$

55) Um feixe de luz polarizada incide sobre duas placas polarizadoras. A direção de polarização da primeira placa faz um ângulo θ com a direção de vibração da luz enquanto a direção de polarização da segunda placa é perpendicular a esta mesma direção de vibração. Se 0,10 da intensidade incidente é transmitida por este sistema, qual é o valor de θ ?

A representação dessa situação é a seguinte:



O ângulo entre os eixos das duas placas é $\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta$

$I_f = 0,10I_0$ é a intensidade da luz após passar pelas duas placas polarizadoras.

Ao passar pela primeira placa: $I = I_0 \cos^2 \theta$

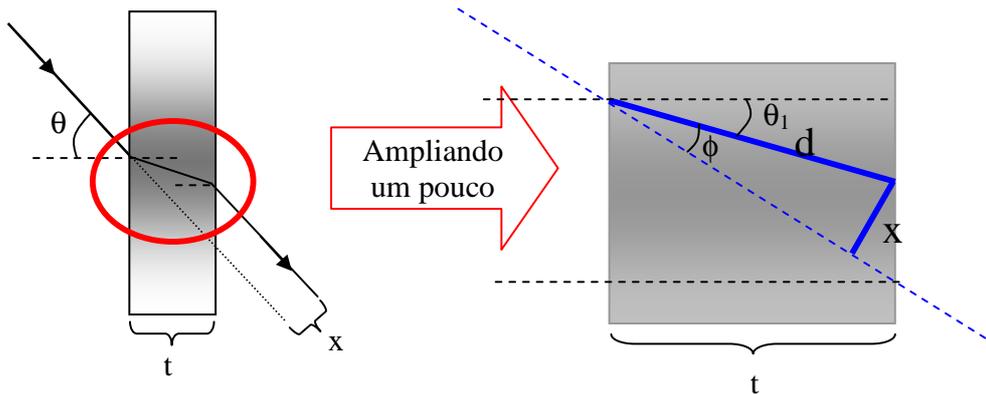
Então, $I_f = I \cos^2 \varphi = I_0 \cos^2 \theta \cos^2 (\pi/2 - \theta) = 0,10 I_0$

$$\cos \theta \sin \theta = \sqrt{0,10} \longrightarrow \sin 2\theta = 2\sqrt{0,10} \longrightarrow \theta = \frac{1}{2} \sin^{-1}(2\sqrt{0,10}) = 20^\circ$$

OBS: Onde foi usada a relação $\cos(a - b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$

PROBLEMAS RESOLVIDOS E COMENTADOS “Halliday – 4”, 4ª edição.

6) Prove que um raio de luz, incidente sobre a superfície de uma placa de vidro, de espessura “t”, emerge na face oposta paralelamente à direção inicial, mas deslocado lateralmente, de acordo com a figura abaixo. Mostre que, para pequenos ângulos de incidência “ θ ”, esse deslocamento é dado por $x = t\theta \frac{n-1}{n}$. Onde “n” é o índice de refração do vidro e “ θ ” é medido em radianos.



Na representação ampliada, podemos definir um triângulo-retângulo de lado “x” e hipotenusa “d”. “ θ_1 ” é o ângulo do raio refratado com a normal à superfície da placa de vidro e “ ϕ ” é um dos ângulos internos da nossa figura. Podemos escrever:

$$x = d \sin \phi, \quad d = \frac{t}{\cos \theta_1} \quad \text{e} \quad \theta = \theta_1 + \phi$$

Com a equação de Snell, temos $\sin \theta = n \sin \theta_1$.

Como estamos considerando pequenos ângulos de incidência, podemos expandir o $\sin \theta$:

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{6} + \frac{\theta^5}{120} - \dots \approx \theta \quad \text{Desprezando os termos de maior potência. Dessa}$$

forma, com a equação “ $\sin \theta = n \sin \theta_1$ ”, temos que $\theta_1 = \frac{\theta}{n}$.

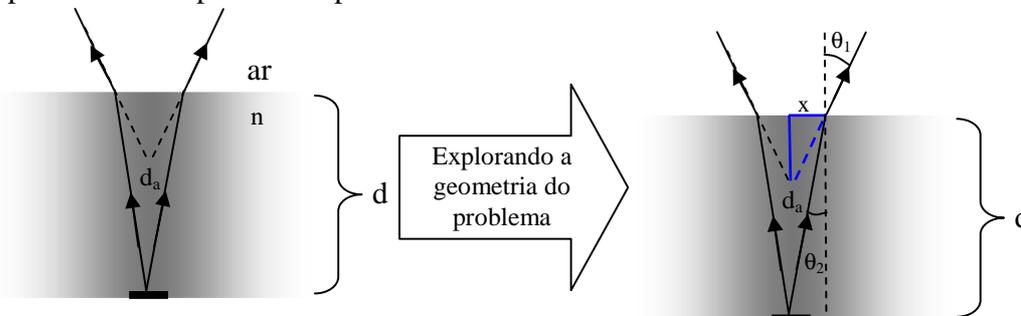
Com isso, escrevemos $\phi = \theta - \theta_1 = \theta - \frac{\theta}{n}$. Então, $\sin \phi = \sin \left(\theta - \frac{\theta}{n} \right) \approx \theta - \frac{\theta}{n}$.

Mas, além disso, $\cos \theta_1 = \cos \left(\frac{\theta}{n} \right) \approx 1$, com o mesmo raciocínio de $\sin \theta$. Assim, da equação

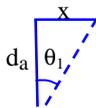
“ $d = \frac{t}{\cos \theta_1}$ ”, temos $d \approx t$. Substituindo esses resultados na equação “ $x = d \sin \phi$ ”, chegamos a seguinte

$$\text{relação: } x = d \sin \phi = t \left(\theta - \frac{\theta}{n} \right) = t \theta \left(\frac{n-1}{n} \right)$$

8) Uma moeda está no fundo de uma piscina de profundidade “d” e índice de refração “n”, como mostra a figura abaixo. Mostre que os raios de luz, próximos à normal, parecem vir de um ponto que está a uma distância $d_a = d/n$, abaixo da superfície. Essa distância é a profundidade aparente da piscina.



Vamos analisar apenas um dos raios e observar a figura geométrica com mais detalhe:



Temos um triângulo-retângulo de lados “x” e “ d_a ” (o que queremos saber). Notamos que um dos ângulos internos é “ θ_1 ”. Os lados “x” e “ d_a ” podem ser relacionados da seguinte forma: $x = d_a \operatorname{tg} \theta_1$

Também podemos escrever o comprimento “x” da seguinte forma:

$$x = d \operatorname{tg} \theta_2 \quad \text{Mas, da Lei de Snell, temos: } \operatorname{sen} \theta_1 = n \operatorname{sen} \theta_2 \Rightarrow \operatorname{sen} \theta_2 = \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{n}$$

A partir das relações trigonométricas, podemos escrever:

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \operatorname{sen}^2 \theta_2} = \sqrt{1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \theta_1}{n^2}}$$

Agora que conhecemos $\operatorname{sen} \theta_2$ e $\cos \theta_2$ em função de $\operatorname{sen} \theta_1$, podemos escrever a $\operatorname{tg} \theta_2$ como segue:

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{n \left(1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \theta_1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

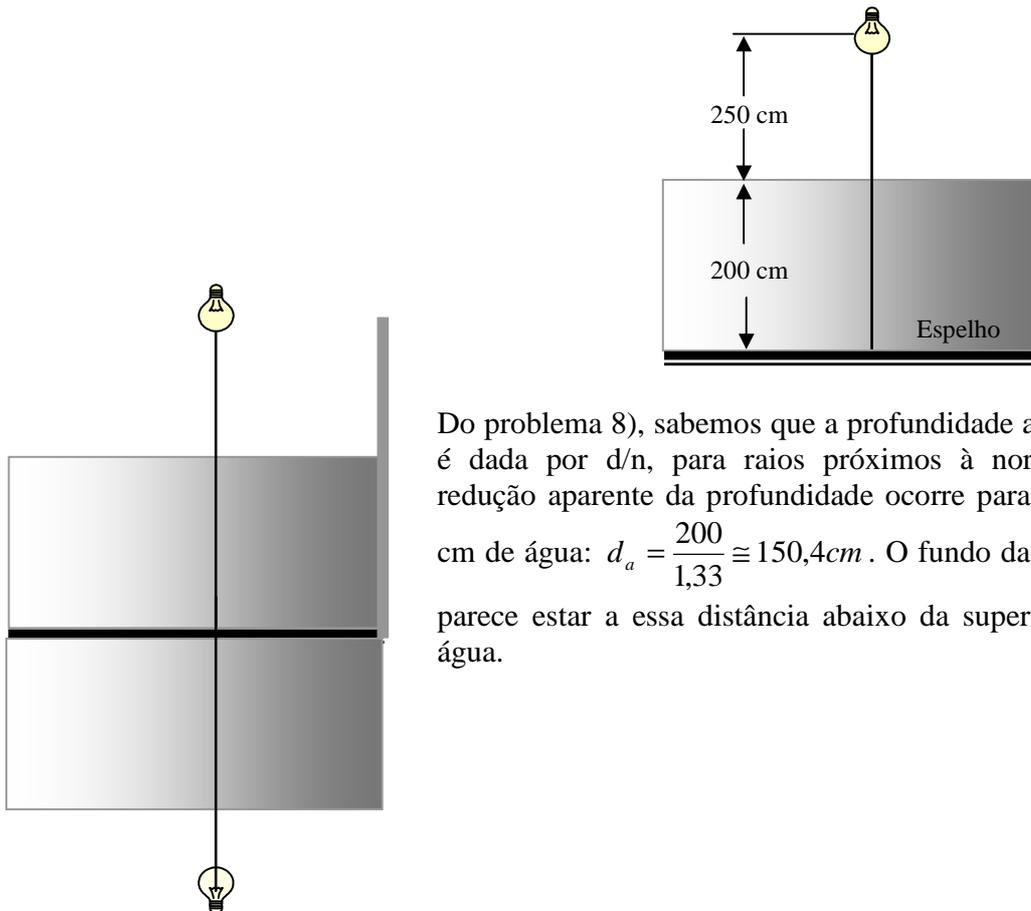
Usando este resultado nas equações para “x”, obtemos:

$$d \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{n \left(1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \theta_1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}}} = d_a \operatorname{tg} \theta_1 \Rightarrow \Rightarrow d_a = \frac{d \cos \theta_1}{n \left(1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \theta_1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Com esse resultado, precisamos lembrar o enunciado do problema, que sugere ângulos próximos à normal, dessa forma, devemos calcular o limite da expressão acima quando “ θ_1 ” tende a zero:

$$\frac{\lim_{\theta_1 \rightarrow 0} d_a}{\lim_{\theta_1 \rightarrow 0}} = \frac{\lim_{\theta_1 \rightarrow 0} \frac{d \cos \theta_1}{n \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}\right)^{\frac{1}{2}}}}{\lim_{\theta_1 \rightarrow 0}} = \frac{d}{n}$$

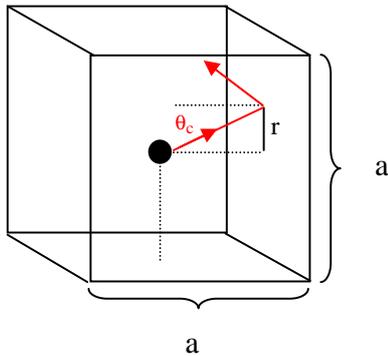
11) A figura abaixo mostra uma pequena lâmpada suspensa 250 cm acima da superfície da água de uma piscina. A profundidade da água é de 200 cm e o fundo da piscina é um grande espelho. Onde está a imagem da lâmpada? Considere apenas os raios próximos ao eixo vertical, que passam pela lâmpada.



Do problema 8), sabemos que a profundidade aparente é dada por d/n , para raios próximos à normal. A redução aparente da profundidade ocorre para os 200 cm de água: $d_a = \frac{200}{1,33} \cong 150,4 \text{ cm}$. O fundo da piscina parece estar a essa distância abaixo da superfície da água.

Nesse caso, o espelho “reproduz” mais 200 cm de água. Então, temos outra redução aparente dos 200 cm. A profundidade está aparentemente reduzida de $200 \text{ cm} - 150,4 \text{ cm} = 49,6 \text{ cm}$. Como isso ocorre duas vezes, temos a redução aparente total igual a 99,2 cm. Se não houvesse mudança de meio, a imagem estaria a uma distância de 450 cm “abaixo” do espelho. Nesse caso, a imagem da lâmpada está: $d_i = 450 \text{ cm} - 99,2 \text{ cm} \cong 351 \text{ cm}$

21) Um cubo sólido de vidro de 10 mm de aresta e índice de refração $n = 1,5$, tem uma pequena mancha no seu centro. a) Que parte de cada face do cubo deve ser coberta para evitar que a mancha seja vista, independentemente da direção em que se olhe ? (Despreze os comportamentos posteriores dos raios refletidos internamente.) b) Que fração da superfície do cubo deve ser coberta ?



A mancha no centro do cubo reflete a luz que chega, em diversas direções. Vamos considerar, de todos os raios possíveis, apenas um, representado em vermelho na figura acima. Para este raio, existe um ângulo crítico “ θ_c ” (em relação à normal na face do cubo, na parte interna) de incidência para o qual o raio é totalmente refletido para o interior do material, caracterizando a *reflexão interna total*. A mancha está localizada a uma distância “ $a/2$ ” da face. Se considerarmos um ângulo sólido a partir de “ θ_c ”, podemos definir uma área circular “ A_f ” de raio “ r ” nessa face do cubo:

$$A_f = \pi r^2$$

De acordo com a figura, “ r ” pode ser determinado por:

$$\operatorname{tg} \theta_c = \frac{2r}{a}$$

Determinamos o ângulo “ θ_c ” através da equação de Snell para a reflexão interna total:

$$n \operatorname{sen} \theta_c = 1$$

A partir dessas expressões, obtemos:

$$\theta_c \cong 42^\circ \quad \text{e} \quad r \cong 4,5 \text{ mm} \Rightarrow A_f = 63,6 \text{ mm}^2$$

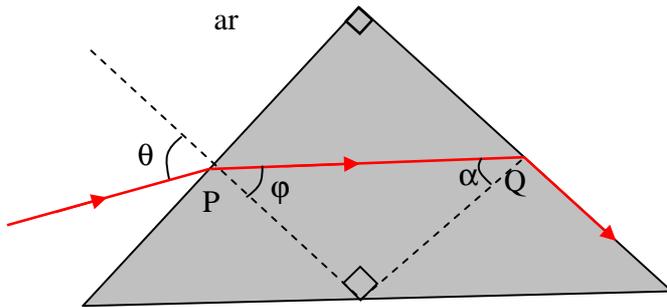
a) “ A_f ” corresponde a área em cada face do cubo que deve ser coberta para que a mancha não seja vista, pois dentro dessa área os raios *não sofrem reflexão interna total*.

b) A fração da superfície do cubo que deve ser coberta é:

$$\frac{A_f}{a^2} \cong 0,636$$

Pois temos $6 \cdot A_f$, considerando todas as faces do cubo e $6 \cdot a^2$, que corresponde a área externa total do cubo.

23) Na figura abaixo, um feixe de luz monocromática entra num prisma reto, no ponto P, com um ângulo de incidência θ e, a seguir, parte da luz é refratada, no ponto Q, com um ângulo de refração de 90° . a) Qual o índice de refração do prisma, em função de θ ? b) Numericamente, qual é o valor máximo que o índice de refração pode assumir? Explique o que acontece com a luz, no ponto Q, se o ângulo de incidência em Q for c) aumentado ligeiramente e d) diminuído ligeiramente.



No ponto P: $\text{sen } \theta = n \text{sen } \varphi$.

No ponto Q: $n \text{sen } \alpha = 1$. Mas, $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi \Rightarrow n \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = n \cos \varphi = 1$.

Temos um sistema de equações:

$$\begin{cases} \text{sen } \theta = n \text{sen } \varphi \\ 1 = n \cos \varphi \end{cases} \begin{array}{c} \text{Elevando ao} \\ \text{quadrado e} \\ \text{somando} \end{array} \Rightarrow \text{sen}^2 \theta + 1 = n^2 \text{sen}^2 \varphi + n^2 \cos^2 \varphi$$

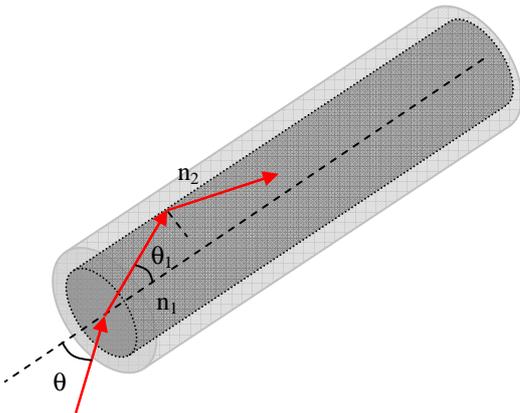
a) Resolvendo para “n”, encontramos: $n = \left(1 + \text{sen}^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}}$.

b) Como $\text{sen } \theta$ é uma função periódica, que varia entre -1 e +1; o seu quadrado varia entre 0 e 1, que é o valor máximo. Então, $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$, fornece o valor máximo para o índice de refração: $n = \sqrt{2}$

c) Se o ângulo de incidência em Q for aumentado, o raio passa a ser totalmente refletido para o interior do prisma.

d) Se for diminuído, emerge na outra superfície do prisma.

26) Uma fibra ótica consiste em um núcleo de vidro (índice de refração n_1) envolvido por uma película (índice de refração $n_2 < n_1$). Suponha um feixe de luz que vai do ar para a fibra, fazendo um ângulo “ θ ” com o eixo da fibra, de acordo com a figura a baixo. a) Mostre que o maior valor possível de “ θ ”, para o qual um raio pode propagar-se pela fibra é dado por $\theta = \text{sen}^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. b) Calcule o valor de “ θ ”, sabendo que os índices de refração do vidro e da película são 1,58 e 1,53, respectivamente.



Vamos chamar de “ θ_1 ” o ângulo do raio refratado com a normal à área da secção transversal.

Temos as seguintes relações:

$\text{sen } \theta = n_1 \text{sen } \theta_1$ ☺ e $n_1 \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) = n_1 \cos \theta_1 = n_2$, pois estamos interessados no caso da reflexão interna total; dentro do material, a luz é totalmente refletida. Com isso, podemos escrever: $\cos \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} = \left(1 - \text{sen}^2 \theta_1 \right)^{\frac{1}{2}}$.

O que leva a: $\text{sen}^2 \theta_1 = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \Rightarrow \text{sen } \theta_1 = \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$. Voltando à equação “☺”,

temos: $\text{sen } \theta = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \Rightarrow \theta = \text{sen}^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional**. Tradução adaptada do original. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Editora Interamericana Ltda, 1980.

ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. **Curso de Física**. 3^a ed. São Paulo: HARBRA, 1993. v. 2.

AMBROSE, B. S.; HERON, P. R. L.; VOKOS, S.; McDERMOTT, L. C. Student understanding of light as an electromagnetic wave: relating the formalism to physical phenomena. **American Journal of Physics**, New York, v. 67, n. 10, p. 891-898, Oct. 1999.

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

ANDERSSON, B. and KÄRRQVIST, C. How swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties. **European Journal of Science Education**, v. 5, n. 4, p. 387-402, 1983.

BACHELARD, Gaston. **A filosofia do não**. 5^o ed. Lisboa: Editorial Presença, 1991.

BACHELARD, G. **La formación del espíritu científico**. Buenos Aires: Ed. Siglo XXI, 1985.

BARBETTA, V. B.; YAMAMOTO, I. Dificuldades conceituais em Física apresentadas por alunos ingressantes em um curso de engenharia. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 24, no. 3, Setembro, 2002.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. 3^o ed. Lisboa: Edições 70, 2004.

BASSALO, J. M. F. **Nascimentos da Física** (3500 a.c. - 1900 a.d.). Belém: Ed. Universitária - UFPA, 1996.

BENDALL, S.; GOLDBERG, F.; GALILI, I. Prospective elementary teacher's prior knowledge about light. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 30, n. 9, p. 1169-1187, Nov. 1993.

BIANCHINI, D.; AMORIM, J. de A. Telecomunicações e aprendizagem significativa: relato de experiência envolvendo a utilização de mapas conceituais na sala de aula de engenharia., Disponível em: <http://docentes.puc-campinas.edu.br/ceatec/davidb/abertura/IniCient/BianchiniTrabalho.pdf>. Acessado em 13 de julho de 2005

BRICKHOUSE, N. W. Children's observations, ideas, and the development of classroom theories about light. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 31, n. 6, p. 639-656, Aug. 1994.

CAMPBELL, D. T.; STANLEY, J. C. Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching. In: GAGE, N. L. **Handbook of research in teaching**, chap. 5. Chicago: Rand McNally, 1963.

CAMPOS, G. M. Estatística Prática para Docentes e Pós-Graduandos. Disponível em: www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro_cap19.html. Atualizada em 19 de janeiro de 2001. Acessada em 10 de agosto de 2006.

CATUNDA, T. Ensino de Óptica Moderna para segundo grau. Disponível em http://www.if.sc.usp.br/pessoal/Gera_HomePessoal.msql?item=1662, acessado em 07 de novembro de 2004.

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

CUDMANI, L. C.; SANDOVAL, J. S.; DANÓN, M. P.; Paradigmas en el aprendizaje de la optica fisica: resultados de duna experiencia piloto. **Revista de Enseñanza de la Física**, Rosário, v.3, n. 1, p. 62-69, 1990.

DE DANÓN, M. P. Concepciones y preconcepciones referidas a la formación de imágenes. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 12, n. 1, 1999, p. 13-46.

DE PAULO, I. J. C.; DE PAULO, S. R.; 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. **Atas do I encontro nacional de pesquisa em Ensino de Ciências**. Águas de Lindóia, SP, 27-29 de novembro de 1997. pg. 273

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 17ª tiragem. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.

FEHER, E.; MEYER, K. R. Childern's conceptions of color. **Journal of Reasarch in Science Teaching**, New York, v. 29, n. 5, p. 505-520, May 1992.

FEHER, E.; RICE, K. A comparison of teacher-student conceptions in optics. **Second International Seminar on misconceptions in Science**, vol II. Cornell, 1987.

FETHERSTONHAUGH, T.; TREAGUST, D. F. Students' understanding of light and its properties: teaching to engender conceptual change. **Science Education**, New York, v. 76, n. 6, p. 653-672, Nov. 1992.

FOWLES, G. R. **Introduction to modern optics**. Second edition. New York: Dover publications, 1989.

GALILI, I. Students' Conceptual change in geometrical optics. **International Journal of Science Education**, London, v. 18, n. 7, p. 847-868, Oct. 1996.

GALILI, I. The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 30, p. 271-301, 1993.

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

GIRCOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O ensino da Óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 18, n. 1, p. 26-40, abr. 2001.

GOLDBERG, F. M.; McDERMOTT, L. An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. **American Journal of Physics**, New York, v. 55, n. 2, p. 108-119, Feb. 1987.

GOLDBERG, F. M.; McDERMOTT, L. C. Not all the wrong answers students give represent misconceptions: examples from interviews in geometrical optics. **First international seminar on misconceptions in science and mathematics**. Cornell, 1983.

GOLDBERG, F. M.; McDERMOTT, L. C. Students difficulties in understanding image formation by a plane mirror. **The Physics Teacher**, p. 472-480, November, 1986.

GOULART, S. M.; DIAS, C. N.; BARROS, S. L. de S. Conceitos espontâneos de crianças sobre fenômenos relativos à luz: análise qualitativa. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 9-20, abr. 1989.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo. **Enseñanza de las Ciencias**. Barcelona, v. 16, n. 2, p. 289-303, jun. 1998.

GRECA, I. M. R. Modelos mentais e modelos físicos no ensino e na aprendizagem de Física. In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (6. : 1998 : Florianópolis). Atas. 2002.

GUISASOLA, J., SALINAS, J.; ALMUD, J. M.; VELAZCO S. Análisis de los procesos de aplicación de las leyes de Gauss y Ampère por estudiantes universitarios de España y Argentina. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 25, no. 2, Junho, 2003.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentos de Física**. vol. 4, 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

HARRES, J. B. S. Um teste para detectar concepções alternativas sobre tópicos introdutórios de Óptica Geométrica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.10, n. 3, p. 220-234, dez. 1993.

HECH, E. Optics. 3 ed. San Francisco: Addison-Wesley Lonman, 1998. HENRÍQUEZ, A. L.; SAHELICES C. C. Revisión bibliográfica sobre la enseñanza/aprendizaje del concepto de campo em Física. **I Encuentro Iberoamericano sobre Investigación Básica en Educación en Ciencias**: actas: Burgos, 18 al 21 de septiembre de 2002 / organizadores, Marco Antonio Moreira, Concesa Caballero Sahelices. – Burgos: Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos, 2003.

HENRÍQUEZ, A. L.; SAHELICES C. C. Revisión bibliográfica sobre la enseñanza/aprendizaje del concepto de campo em Física. **I Encuentro Iberoamericano sobre Investigación Básica en Educación en Ciencias**: actas: Burgos, 18 al 21 de septiembre de 2002 / organizadores, Marco Antonio Moreira, Concesa Caballero Sahelices. – Burgos: Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos, 2003.

HEWITT, P. G. **Conceptual physics**. 8 ed. San Francisco: Addison-Wesley Lonman, 1998.

JUNG, W. Understanding students' understandings: the case of elementary optics. **Second International seminar on misconceptions in science**, vol III. Cornell, 1987.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5^a ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1998.

LANGLEY, D.; RONEN, M.; EYLON, B. Light propagation and visual patterns: preinstruction learner's conceptions. **Journal of Reasarch in Science Teaching**, New York, v. 34, N. 4, P. 399-424, Apr. 1997.

MAGALHÃES, M. de F.; SANTOS, W. M. S.; DIAS, M. C. P. Uma proposta para ensinar os conceitos de campo elétrico e magnético: uma aplicação da História da Física. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 24, no. 4, Dezembro, 2002.

MCDERMOTT, L. C. Como ensinamos y como aprenden los estudiantes: um desajuste ? **Atas da III escola latino-americana sobre pesquisa em Ensino de Física – III ELAPEF**, 1 a 12 de julho de 1996.

MENEGOLLA, A. M. Usando mapas conceituais no estudo da matemática. IV Encontro ibero-americano de coletivos escolares e redes de professores que fazem investigação na sua escola. Disponível em <http://ensino.univates.br/~4iberoamericano/trabalhos/trabalho031.pdf>. Acessado em 28/07/2005.

MOHAPATRA, J. K. Induced in incorret generalizations leading to misconceptions: an exploratory investigation about the laws of reflection of light. **Journal of Reasarch in Science Teaching**, New York, v. 25, n. 9, p. 777-784, Nov. 1988.

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. 2^a reimpressão (2004), São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária LTDA, 1999.

MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. In **Ciência & Educação**, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.

MOREIRA, M. A.; PINTO, A. de O. Dificuldades dos alunos na aprendizagem da Lei de Ampère, à luz da Teoria dos Modelos Mentais de Johnson-Laird. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 25, no. 3, Setembro, 2003.

MOREIRA, M. A. Linguagem e aprendizagem significativa. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/~moreira/>. Acessado em 05 de setembro de 2004.

MOREIRA, M. A. Ensino de Física no Brasil: retrospectiva e perspectivas. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol 22, n° 1, Março, 2000.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1999.

MOREIRA, M. A.; SILVEIRA, F. L. da. **Instrumento de Pesquisa em Ensino e Aprendizagem : a entrevista clinica e a validação de testes de papel e lápis**. Porto Alegre: editora EDIPUCRS, 1993.

MOREIRA, M. A. **Uma abordagem cognitivista ao ensino da Física**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1983.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais no ensino da Física**. Textos de apoio ao professor de Física, N° 3. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 1992.

MOREIRA, M. A; OSTERMANN, F. **Teorias construtivistas**. Textos de apoio ao professor de Física, n° 10. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 1999.

NUSSENZVEIG, H. M. **Ótica, Relatividade e Física Quântica: curso de física básica**, v. 4. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

NETO, P. L. de O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

NOVAK, J. D. Underlying Concept Maps and How To Construct Them Disponível em <http://cmap.coginst.uwf.edu/info/>. Acessado em 26 de fevereiro de 2006.

PALACIOS, F. J. P.; CAZORLA, F. N.; MADRID, A. C. Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. **International journal of Science Education**, London, v. 11, n. 3, p. 273-286, Mar. 1999.

PESA, M. Concepciones y preconcepciones referidas a la formación de imágenes. **Revista de Enseñanza de la Física**, Cordoba, v. 12, n. 1, p. 13-46, mayo 1999.

PESA, M. Obstáculos en el aprendizaje de la polarización luminosa: una experiencia con profesores de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 218-225, 1999.

PESA, M.; CUDMANI, L. C. de; BRAVO, S. Formas de razonamientos asociados a los sistemas preconceptuales sobre naturaleza y propagación de la luz: resultados de una experiencia piloto. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 1, p. 17-31, abr. 1995.

PESA, M.; CUDMANI, L. C. de; SANDOVAL, J. S. de. Transferencia de resultados de la investigación educativa al aprendizaje de la óptica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 15, n. 1/4, p. 42-51, 1993.

PIAGET, J.; GARCIA, R. **Psicogenesis e historia de la ciencia**. México: Siglo Vientiuno, 1984.

PIETROCOLA, M. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001.

RICE, K.; FEHER, E. Pinholes and images: children's conceptions of light and vision I. **Science Education**, New York, v. 71, n. 4, p. 629-639, July 1987.

ROBERT E. A. Misconceptions among pupil regarding geometrical optics. **Second International seminar on misconceptions in science**, vol III. Cornell, 1987.

RONEN, M.; EYLON, B. S. To see or not to see: the eye in geometrical optics: when and how ? **Physics Education**, Bristol, v. 28, n.1, p. 52-59, Jan. 1993.

ROSA, C. LA; MAYER, M.; PATRIZI, P. And MISSONI, M. V. Commonsense knowledge in optics: preliminary results of on investigation into the properties of light. **European Journal of Science Education**, v. 6, n. 4, p. 387-397, 1984.

SILVA, J. H. D. da . Algumas considerações sobre ensino e aprendizagem na disciplina laboratório de eletromagnetismo. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 24, no. 4, Dezembro, 2002.

SALINAS, J.; SANDOVAL, J. Objetos e imágenes reales y virtuales en la enseñanza de la optica geometrica. **Revista de Enseñanza de la Física**, Cordoba, v. 12, n. 2, p. 23-36, sep. 1999.

SALINAS, J.; SANDOVAL, J. Enseñanza experimental de la óptica geométrica: campos de visión de lentes e espejos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 22, n. 2, 2000.

SANSÃO, M. O.; CASTRO, M. Da Luz; PEREIRA, M. P. Mapa de conceitos e aprendizagem dos alunos. Disponível em: <http://www.iie.min-edu.pt/inovbasic/biblioteca/ino15-art5/mapa-conceitos.doc>. Acessado em 28/07/2005

SELLEY, N. J. Children's ideas on light and vision. **International Journal of Science Education**, London, v. 18, n. 6, p. 713-723, June 1996.

SIERADZAN, A. Teaching geometrical optics with the "optic mirage". **The Physics Teacher**, College Park, v. 28, n. 8, p. 534-536, Nov. 1990.

SILVEIRA, F. L.; MOREIRA, M. A.; AXT, R. Validação de um teste para verificar se o aluno possui concepções científicas sobre corrente elétrica em circuitos simples. **Ciência e Cultura**. São Paulo, v. 41, n. 11, p. 1129-1132, 1989.

SILVEIRA, F. L. **Uma epistemologia racional-realista e o ensino da Física**. 1993. 204 p. Tese de doutorado defendida no programa de pós-graduação em Educação da PUCRS.

SILVEIRA, F. P. R. de A. A aprendizagem significativa na formação de professores de Biologia: o uso de mapas conceituais. **ABRAPEC-Associação brasileira de pesquisa em Educação em Ciências**, p. 29, 2004.

SINGH, A. and BUTLER, P. H. Refraction: conceptions and knowledge structure. **International Journal of Science Education**, London, v. 12, n. 4, p. 429-442, 1990.

SMITH, D. C. Primary teacher's misconceptions about light and shadows. **Second International Seminar on misconceptions in Science**, vol II. Cornell, 1987.

TAVARES, R.; LUNA, G. Mapas Conceituais: uma ferramenta pedagógica na consecução do currículo. I Colóquio Internacional de Políticas Curriculares - novembro/2003 - João Pessoa. Disponível em <http://www.fisica.ufpb.br/~romero/pdf/ICIPC.pdf>. Acessado em 29 de julho de 2005.

TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros**. v. 4, 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

VALADARES, J.; FONSECA, F. Uma estratégia construtivista e investigativa para o ensino da Óptica. Revista da ABRAPEC: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação de Ciências, v. 4, n. 3, p. 74, set/dez, 2004. Disponível em <http://www.fc.unesp.br/abrapec/revistav4n3.htm>. Acessado em 20/08/2005.

VELAZCO, S.; SALINAS, J. Comprensión de los conceptos de campo, energía y potencial eléctricos y magnéticos en estudiantes universitarios. In **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 23, no. 3, Setembro, 2001.

VERGARA, D. A.; BUCHWEITZ, B. O uso de um vídeo no estudo do fenômeno de refração da luz. Revista da ABRAPEC: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação de Ciências, vol 1, n. 3, p. 39, set/dez, 2001. Disponível em <http://www.fc.unesp.br/abrapec/revistav1n3.htm>. Acessado em 20/08/2005.

VIANNA, H. M. **Testes em educação**. São Paulo, IBRASA, Fundação Carlos Chagas, 1973.

WOSILAIT, K.; HERON, P. R. L.; SHAFFER, P. S.; McDERMOTT, L. C. Development and assessment of a research-based tutorial on light and shadow. **American journal of Physics**, New York, v. 66, n. 10, p. 906-913, Oct. 1998.

WONNACOTT, T.; WONNACOTT, R. J. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.

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**, New York, v. 67, n. 7, July 1999.