



Pós-Graduação em **Astronomia**
MESTRADO PROFISSIONAL
UEFS



BRAIAN BARBOSA DE OLIVEIRA

**CRITÉRIO DE RESOLUÇÃO DE RAYLEIGH: PROPOSTA DE ATIVIDADE
EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DA DIFRAÇÃO**

FEIRA DE SANTANA

2020

BRAIAN BARBOSA DE OLIVEIRA

**CRITÉRIO DE RESOLUÇÃO DE RAYLEIGH: PROPOSTA DE ATIVIDADE
EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DA DIFRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Astronomia – Mestrado Profissional, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Astronomia

Orientador(a): Marildo Geraldete Pereira

FEIRA DE SANTANA

2020



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CANDIDATO (A): BRAIAN BARBOSA DE OLIVEIRA

DATA DA DEFESA: 12 de agosto de 2020 LOCAL: Via Google Meet

HORÁRIO DE INÍCIO: 14h03min

MEMBROS DA BANCA		FUNÇÃO	TÍTULO	INSTITUIÇÃO DE ORIGEM
NOME COMPLETO	CPF			
MARILDO GERALDÊTE PEREIRA	793.153.647-91	Presidente	DR	DFIS - UEFS
GERMANO PINTO GUEDES	407.961.595-72	Membro	DR	DFIS - UEFS
LEANDRO DE OLIVEIRA KERBER	928.412.520-00	Membro	DR	UESC

TÍTULO DEFINITIVO DA DISSERTAÇÃO*:

CRITÉRIO DE RESOLUÇÃO DE RAYLEIGH: PROPOSTA DE ATIVIDADE EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DA DIFRAÇÃO.

*Anexo: produto(s) educacional(is) gerado(s) neste trabalho.

Em sessão pública, após exposição de 50 min, o(a) candidato(a) foi argüido(a) oralmente pelos membros da banca, durante o período de 1h30min. A banca chegou ao seguinte resultado**:

- (X) APROVADO(A)
() INSUFICIENTE
() REPROVADO(A)

** Recomendações¹: Atentar para as sugestões indicadas pela banca avaliadora

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é abaixo assinada pelos membros da banca, na ordem acima relacionada, pelo candidato e pelo coordenador do Programa de Pós-Graduação em Astronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Feira de Santana, 12 de Agosto de 2020

Presidente:

Membro 1:

Membro 2:

Membro 3:

Candidato (a):

Coordenador do

PGAstro:

¹ O aluno deverá encaminhar à Coordenação do PGAstro, no prazo máximo de 60 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da Dissertação, após realizadas as correções sugeridas pela banca.



**ANEXO DA ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE Mestrado:
PRODUTO(S) EDUCACIONAL(IS) GERADO(S) NO TRABALHO FINAL DE CURSO**

CANDIDATO (A): BRAIAN BARBOSA DE OLIVEIRA

DATA DA DEFESA: 12 de agosto de 2020 LOCAL: Via Google Meet

HORÁRIO DE INÍCIO: 14h03min

PRODUTO EDUCACIONAL: ROTEIRO EXPERIMENTAL PARA ENSINO DA DIFRAÇÃO

Feira de Santana, 12 de Agosto de 2020.

Presidente:

J. K. de P.

Membro 1:

P/ Carlos Alberto de Lima Ribeiro

Membro 2:

P/ Carlos Alberto de Lima Ribeiro

Membro 3:

Candidato (a):

Braian Barbosa de Oliveira

Coordenador do

PGAstro:

Carlos Alberto de Lima Ribeiro

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

Oliveira, Braian Barbosa de
O45c Critério de resolução de Rayleigh: proposta de atividade experimental para o ensino da Difração / Braian Barbosa de Oliveira. – 2020.
140f.: il.

Orientador: Marildo Geraldête Pereira

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Astronomia, 2020.

1. Difração. 2. Critério de Rayleigh. 3. Astronomia. 4. Ensino médio. I. Pereira, Marildo Geraldête, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 535.4

À minha avó, Maria Alexandrina Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Saudade, esse foi o sentimento que me levou inicialmente a retornar a UEFS, mas agora para o Mestrado. Saudade dos estudos, saudade das companhias do laboratório, saudade da pesquisa em ensino, saudade da Astronomia, saudade da Academia, saudade do Sertão. E qual não foi a frustração logo nos primeiros meses ao perceber que seria impossível matar essa saudade, impossível pois a seta do tempo só tem uma direção. Impossível pois percebi logo nas primeiras semanas que embora o corpo docente fosse muito similar, os colegas eram outros, as responsabilidades eram outras, o ambiente era outro, eu já era outro.

Mas logo a frustração deu espaço para a alegria, alegria ao perceber que a escolha de ingressar no MPASTRO foi a melhor escolha entre qualquer programa de Pós-Graduação que eu poderia ter feito, por me permitir perceber que embora tudo fosse diferente, não era pior, apenas diferente. E de um modo positivo, afinal, foi a diferença que fez mudar tanto o jovem que aos 17 anos chegava em Feira de Santana para estudar física, e mudar muito. E seria essa mesma diferença que encontraria ao chegar 5 anos depois no MPASTRO.

Diferenças entre colegas, diferenças de idade, diferenças de mentalidade, diferenças de cidade, diferenças de estado. E seria essa diferença novamente que me levaria à um novo ciclo de aprendizado, longe de qualquer zona de conforto.

Por todo este aprendizado, e apoio, agradeço ao meu orientador desde a graduação! Professor Dr. Marildo G. Pereira, pela paciência, pela comunicação, pela compreensão nesses quase 8 anos de orientação.

Agradeço aos meus pais, Zelmiro A. de Oliveira e Lêda M. B. de Oliveira, sem os quais não teria chegado nem na metade da minha trajetória de estudos, sobretudo à minha mãe, por ter acreditado que seria a educação que mudaria as nossas vidas e junto a eles, à minha irmã Brenda B. de Oliveira.

Agradeço a companhia e todo amor dedicado da minha namorada Laira S. Lopes, pela compreensão em dividir a atenção com os meus quase que intermináveis estudos e noites de trabalho.

A todos colegas de turma, com os quais aprendi muito neste período. Em especial, ao grupo dos “Hospedeiros”, Abelardo P. N. Junior, José Augusto R. C. dos Santos e Anderson A. Matos por todas sextas hospedadas que conseguiam fazer a alegria e que já estão deixando saudades.

A FAPESB por meio do Governo do Estado da Bahia pelo investimento nesta pesquisa.

A todos professores do programa e funcionários envolvidos desde o colegiado aos funcionários do Antares.

Ao colégio Dínamo e o Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana, pela compreensão e apoio durante esta fase de formação.

A UEFS e o Sertão da Bahia, sem os quais eu não seria o mesmo, e que hoje carrego não só no currículo, mas na pele comigo para sempre.

E porque não, ao meu cão, Planck. Por aguentar as sextas sem minha presença.

A todos, agradeço.

"Os poetas reclamam que a ciência retira a beleza das estrelas. Mas eu posso vê-las de noite no deserto, e senti-las. Vejo menos ou mais?"
Richard Feynman

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVIII
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – FENÔMENOS DA ÓPTICA FÍSICA E AS PROPOSTAS EXPERIMENTAIS NO ENSINO MÉDIO	9
2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS	9
2.2 FENÔMENO ONDULATÓRIO: REFLEXÃO	12
2.3 FENÔMENO ONDULATÓRIO: REFRAÇÃO	15
2.4 FENÔMENO ONDULATÓRIO: POLARIZAÇÃO.....	17
2.5 FENÔMENO ONDULATÓRIO: INTERFERÊNCIA	20
2.5. FENÔMENO ONDULATÓRIO: DIFRAÇÃO	23
CAPÍTULO 3 – O PODER DE RESOLUÇÃO	26
3.1 - O PROBLEMA DA RESOLUÇÃO NA ASTRONOMIA.....	26
3.2 - PODER DE RESOLUÇÃO E CRITÉRIO DE RAYLEIGH.....	35
3.2.1 KIT-DIDÁTICO PARA ESTUDO DO CRITÉRIO DE RAYLEIGH COMO CONTEXTUALIZAÇÃO DO FENÔMENO DA DIFRAÇÃO	40
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO DA PROPOSTA	43
4.1 – METODOLOGIA.....	43
4.1.1 - PÚBLICO ALVO E LOCAIS DE APLICAÇÃO	44
4.1.2 – APLICAÇÃO DO PRÉ-TESTE – 1ª FASE	46
4.1.3 – INTRODUÇÃO E FENÔMENOS ONDULATÓRIOS – 2ª FASE	49
4.1.4 – APRESENTANDO O FENÔMENO DA DIFRAÇÃO – 3ª FASE.....	50
4.1.4 – DIFRAÇÃO E O CRITÉRIO DE RAYLEIGH – 4ª FASE	52
4.1.5 – APLICAÇÃO DO PÓS-TESTE – 5ª FASE	58
4.2 – MATERIAIS	59
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
5.1 – RESULTADOS DA PROPOSTA EXPERIMENTAL	62
5.2 – RESULTADOS DA PROPOSTA DIDÁTICA	72
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conteúdos mais recorrentes da Física ENEM entre os anos de 2009 a 2017. Evidenciando uma alta demanda dos conteúdos ligados ao estudo da ondulatória.	6
Figura 2 – Onda mecânica se propagando na superfície de um líquido.	10
Figura 3 – Representação de uma onda eletromagnética com os planos de oscilação do campo elétrico (nesta figura, vertical) e do campo magnético (nesta figura, horizontal). ..	10
Figura 4 – Onda transversal gerada em uma corda.	11
Figura 5 – Onda longitudinal gerada em uma mola por meio de uma vibração ao longo da mola.	11
Figura 6 - Esquema simplificado representando o fenômeno de reflexão de uma onda unidimensional se propagando numa corda. Na primeira, a onda se desloca na direção de um obstáculo, na segunda e terceira, a onda encontra o obstáculo e é refletida com inversão de fase.	12
Figura 7 - Em A, as frentes de onda incidem sob o anteparo. Chegando a B temos a reflexão da primeira frente de onda, as demais etapas, C e B representam a reflexão das outras frentes de onda. Chegando em E das frentes de onda incidente (PQ) e da onda refletida (P'Q'.....	13
Figura 8 - Refração da luz em um copo com água. Dando impressão visual que a caneta estaria partida ao meio.	15
Figura 9 - Esquema do fenômeno refração com as variáveis indicadas n_1 e n_2 como os índices de refração dos meios, θ_1 e θ_2 como os ângulos de incidência e refração respectivamente.	16
Figura 10 - Esquema simplificado do funcionamento de um polarizador. Em (A) gerando ondas circulares, seguido de (B) com ondas planas com polarização vertical.	17
Figura 11 - Esquema simplificado da passagem de luz natural (não polarizada) por dois polarizadores com planos de polarização perpendiculares entre si.....	18
Figura 12 - Comparativo da observação de ambientes bem iluminados por meio de lentes não-polarizadas (à esquerda) e lentes polarizadas (direita).	19
Figura 13 - Esquema do princípio da superposição de ondas em seu caminho de propagação. Em (A) temos o resultado da superposição de ondas com deslocamentos verticais não invertidos. Em (B) temos a superposição de ondas com deslocamentos verticais invertidos	20

Figura 14 - Esquema da interação entre duas frentes de onda. Gerando interferência construtiva, ou ainda destrutiva. A linha contínua indica a onda resultante, enquanto a pontilhada indica as ondas superpostas. Em uma situação de interferência construtiva e destrutiva.	21
Figura 15 - Anéis de Newton, figura de interferência que representa as áreas de interferência construtiva nos pontos claros, e destrutiva nos pontos escuros.	22
Figura 16 - São Martinho do Porto, uma das baías, mas bonitas do mundo. Por meio da figura, pode-se perceber a difração das ondas que entram pela baía na direção do continente.	23
Figura 17 - Esquema simplificado de ondas planas e paralelas se deslocando na direção da praia após passar por uma fenda. Comparação do resultado previsto pelo senso comum (a) com o experimental (b).	24
Figura 18 - Esquema do Princípio de Huygens, com uma onda de comprimento de onda λ difratando ao atravessar uma fenda.	25
Figura 19 – Ilustração de um mesmo objeto ao ser observado com capacidades de resolução diferentes. Em (a) baixa resolução, em (b) com uma maior resolução angular. Neste caso, obtida com o uso de Óptica Adaptativa.	27
Figura 20 - Imagens obtidas do sistema binário <i>Zeta Aquarii</i> (com 2" de separação) por meio do mesmo telescópio newtoniano de 200mm de abertura em diversos momentos. Evidenciando a perda da separação entre as componentes.	28
Figura 21 – Imagem feita do Sol próximo ao horizonte, sujeito aos efeitos de distorção, avermelhamento, absorção e refração.	29
Figura 22 - Comparação do padrão de interferência por difração na condição de máxima resolução (a), comparado à condição (b), com perda de resolução gerada pela turbulência atmosférica. Considerando o fluxo luminoso constante embora as figuras a e b estejam fora de escala.	30
Figura 23 – Escala de Pickering's classificando as condições de 1 a 10, em ordem de qualidade de imagem, onde 1 representa uma imagem muito ruim e 10 uma imagem perfeita. No limite de resolução definido pelo critério de Rayleigh.	31
Figura 24 – Esquema de uso da técnica da OA por meio de um espelho deformável.	31
Figura 25 - Espelho adaptativo de 1,12 m de diâmetro do Observatório Europeu do Sul.	32
Figura 26 - Imagem do bojo da Galáxia, na esquerda sem o uso da OA e na direita, com o uso da OA.	33

Figura 27 – Imagem de HP 1 obtida utilizando o telescópio Gemini Sul no Chile com o uso de OA.....	33
Figura 28 - α Cen e sua mais próxima companheira. Observada como uma única estrela a olho nu, e como um sistema binário num telescópio de pelo menos 5cm.	35
Figura 29 - Difração da luz por uma fenda de largura d vista em um anteparo a uma distância L . Tendo representado as posições dos máximos e mínimos de interferência. .	36
Figura 30 - Ilustração da perda de resolução quando reduzida a separação angular das fontes, sobreposta aos padrões de difração. Na primeira e segunda imagem da sequência a separação entre as fontes é resolvida. Enquanto nas duas últimas há a perda de resolução.	37
Figura 31 - Esquema experimental do fenômeno da difração e gráfico da intensidade dos máximos de difração de dois objetos através de um orifício.....	38
Figura 32 - Quatro imagens registradas a mesma distância de dois pontos luminosos em solo. Variando apenas a obstrução do tubo do telescópio. Iniciando com os objetos perfeitamente visíveis (a), passando pelo limite de Rayleigh (c), e chegando ao ponto onde não é possível resolver a separação entre as fontes.....	38
Figura 33 – Mapa conceitual construído para localização do limite de difração de Rayleigh no contexto da Óptica física na educação básica. Construído utilizando o software Cmap Tolls.	40
Figura 34 - Tabela ou Optótico de Snellen, diagrama utilizado para	42
Figura 35 – Fluxograma das etapas da pesquisa.	44
Figura 36 - Concepções de uma onda plana ao passar por uma fenda. Em (A) o resultado previsto, em (B) o resultado experimental. Descrito por Huygens.	50
Figura 37 - Tabela de Snellen. Utilizada em teste de acuidade visual.	52
Figura 38 - <i>Alpha Capricorni</i> , sistema de estrelas binárias. Nas quais as componentes aparecem próximas no plano do céu.	53
Figura 39 – Simulação do PhET para ilustrar o fenômeno da difração e interferência da luz ao passar por uma fenda circular.	54
Figura 40 – Padrões de difração/interferência de duas fontes ao passar por uma fenda, e ao lado, ilustração da imagem das fontes, bem resolvidas.....	54
Figura 41 - Interface do <i>Applet</i> em diversas configurações entre as fontes e em níveis de resolução diferentes. Que podem ser obtidos ao variar a separação entre as fontes, ou a abertura do instrumento óptico.	55

Figura 42 - Arranjo desenvolvido para estudo do critério de Rayleigh por meio da proposta. Em A o suporte para fixação da prancheta, B a prancheta com o padrão utilizado e C a montagem completa.	56
Figura 43 - Esquema em perspectiva da realização do experimento	57
Figura 44 - Exemplo de medida de diâmetro de pupila. Realizadas sob as mesmas condições de iluminação para os três estudantes.	58
Figura 45 – Em a) aparece o padrão de linhas montado para aplicação do roteiro. E ao lado direito, b) mostra os materiais utilizados para a realização.	59
Figura 46 – Aplicação da proposta experimental no pátio do Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana – Aramari (BA)	60
Figura 47 – Aplicação da proposta experimental no Colégio Dínamo – Alagoinhas (BA).61	
Figura 48 - Folhas utilizadas na realização da proposta complementar ao experimento proposto. Apresentando a folha branca – utilizada anteriormente – seguida de outras cores em ordem crescente de comprimentos de onda.	64
Figura 49 – Gráfico Relacionando o limite de resolução θ_E com cada cor/comprimento de onda λ	66
Figura 50 - Gráfico relacionando as distâncias máximas para qual é possível resolver a separação entre as linhas para cor do padrão.....	68
Figura 51 – Gráfico Relacionando o limite de resolução θ_E com cada cor/comprimento de onda λ com os dados fornecidos pela aplicação dos mestrandos da 7ª turma.....	70
Figura 52 – Correlação feita entre os valores do critério de Rayleigh obtido para cada cor na proposta adicional. Os resultados da aplicação preliminar como os valores esperados, e os resultados da aplicação feita pelos mestrandos da 7ª Turma do MASTRO, como os valores observados.....	71
Figura 53 – Análise das respostas do pré-teste do CEPMCS. Aplicado no 2ª A e B Matutino	73
Figura 54 - Análise das respostas do pré-teste do CEPMCS. Aplicado à turma de controle 2ª A Vespertino	73
Figura 55 - Análise das respostas do pré-teste no Colégio Dínamo. Aplicado no 2ª A.....	74
Figura 56 - Análise das respostas do pré-teste no Colégio Dínamo. No 2ºB Turma de controle.	74
Figura 57 - Análise das respostas do pós-teste no CEPMCS. Aplicado às turmas 2ºA e 2ºB	75

Figura 58 - Análise das respostas do pós-teste no CEPMCS. Aplicado à turma de controle 2ª A Vespertino	76
Figura 59 - Análise das respostas do pré-teste no Colégio Dínamo. Aplicado no 2ª A.....	76
Figura 60 - Análise das respostas do pós-teste no Colégio Dínamo. Aplicado na turma de controle 2ª B	77
Figura 61 – Variação de acertos nas questões dos testes no CEPMCS	77
Figura 62 - Variação de acertos nas questões dos testes no Colégio Dínamo.....	78
Figura 63 – Configuração utilizada na ferramenta <i>t test calculator</i>	82
Figura 64 – Um dos protótipos testados durante a pesquisa. Investigando a possibilidade de utilizar LEDs de diferentes comprimentos de onda no roteiro.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Contagem dos estudantes envolvidos por turma e local de ensino	45
Tabela 2 – Questões do Pré-Teste aplicado na 1ª Fase, com comentários do autor sob a motivação por trás de cada questão.	46
Tabela 3 – Sequências de aulas realizadas na aplicação do trabalho no Ensino Médio ..	49
Tabela 4 - Medida das distâncias mínimas “ R ” para as quais observador passa a não resolver individualmente as linhas.	58
Tabela 5 – Valores das distâncias em que os observadores perdem resolução do espaçamento entre as linhas escura do padrão (R)	62
Tabela 6 - Resultados da metodologia nos colégios.	63
Tabela 7 - Resultados da metodologia com a turma de Física IV e do MPASTRO.....	63
Tabela 8 – Resultados da aplicação preliminar do experimento para as folhas em cores	65
Tabela 9 - Resultados da aplicação preliminar do experimento para as folhas em cores .	65
Tabela 10 – Ajuste linear sob os pontos da curva θ_E versus λ	66
Tabela 11 - Ajuste linear sob os pontos da curva R versus $1/\lambda$	68
Tabela 12 – Resultados da aplicação remota feita pelos mestrandos da 7ª Turma do MPASTRO para as folhas em cores.	69
Tabela 13 - Resultados da aplicação remota feita pelos mestrandos da 7ª Turma do MPASTRO para as folhas em cores.	69
Tabela 14 - Ajuste linear sob os pontos da curva θ_E versus λ na aplicação remota	70
Tabela 15 – Classificação criada para as respostas dos estudantes às questões do pré-teste	72
Tabela 16 – Variação percentual do número de acertos entre pré e pós testes do CEP MCS	78
Tabela 17 - Variação percentual do número de acertos entre pré e pós testes do Dínamo	78
Tabela 18 – Apresentação das médias de acerto por questão do pré-teste nas 4 turmas	79
Tabela 19 - Apresentação das médias de acerto por questão do pós-teste nas 4 turmas	80
Tabela 20 – Quadro das regras de decisão	80
Tabela 21 – Quadro das regras de decisão aplicadas ao presente trabalho.....	80
Tabela 22 – Quantificando as probabilidades (valor- p) no teste- t	81
Tabela 23 – Dados para obtenção do t-Esperado/Crítico.....	82

Tabela 24 – Leitura do t esperado em relação a H_0	83
Tabela 25 – Apresentação dos resultados do teste t aplicado à média dos acertos.	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CEPMCS	Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana
ENEM	Exame Nacional do Ensino Médio
HST	Hubble Space Telescope
IOP	Institute of Physics
ISEE	International Society for the Enhancement of Eyesight
LED	Light emitting diode
MPASTRO	Mestrado Profissional em Astronomia
MNPEF	Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física
OA	Óptica adaptativa
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PhET	Physics Education Technology

RESUMO

O ensino da Óptica Física é uma das áreas mais negligenciadas no ensino de física na educação básica, geralmente resumido ao estudo geométrico da luz e baseado somente nas relações matemáticas, longe dos conceitos ondulatórios e focado nos fenômenos da reflexão e refração da luz. Tal tratamento têm privando os estudantes da discussão dos aspectos ondulatórios e dos fenômenos oriundos desta interpretação.

Sob a orientação de documentos oficiais como o PCN e a BNCC, pode-se afirmar que ao perder a oportunidade em apresentar conteúdos como difração, interferência, entre outros, é proporcionada uma formação deficitária no que tange fenômenos tão importantes dentro da Óptica. Permitindo afirmar ainda, por estarem tão presentes no dia a dia, que estamos tratando com temas imprescindíveis na formação do cidadão para a leitura das tecnologias e fenômenos que o cercam.

Com a intenção de contribuir para minorar esta problemática, este trabalho se debruça sobre duas estratégias para enfrentamento deste problema. A primeira delas é a proposta de uma atividade experimental, visto que já é consolidada a ideia de que o uso de atividades experimentais é uma peça fundamental no ensino de ciências, e com resultados significativos apresentados na literatura. A segunda é apresentar essa proposta de forma contextualizada a um problema fortemente ligado à Astronomia, uma vez que esta área apresenta um potencial em atrair a atenção e desenvolver o imaginário dos estudantes.

Desse modo, o presente trabalho oferece uma proposta de produto educacional que explora o problema do poder da resolução angular sob a perspectiva do critério de Rayleigh. Buscando oferecer para os professores do ensino médio e superior uma alternativa de contextualização no estudo da difração da luz, fenômeno relacionado com o fator limitante da nossa capacidade em resolvermos fontes luminosas próximas, como faróis de carro em uma estrada, estrelas binárias, galáxias próximas no plano celeste, planetas com satélites, anéis planetários, entre outros. Partindo desta última contextualização uma motivação riquíssima para a apresentação do problema da resolução, com um grande e natural apelo as estudantes.

Com o objetivo de, por meio dessa proposta, contribuir para a mudança do cenário do ensino da Óptica Física na educação básica, apresento neste trabalho resultados de diversas aplicações da metodologia proposta, realizada nos níveis médio e superior de ensino. Tendo como foco principal o público do ensino médio em duas instituições de ensino, uma da rede privada e outra da rede pública do estado da Bahia.

Os quais apresento e analiso para a obtenção do critério de Rayleigh através de uma proposta acessível, que envolveu um total de 141 estudantes e professores. Os resultados associados a aprendizagem dos estudantes foram ainda analisados de maneira estatística utilizando o teste de *Student* (teste-t), o qual nos permitiu de forma assertiva correlacionar a proposta didática à uma contribuição para o aumento da aprendizagem.

Palavras-chave: Critério de Rayleigh, Resolução, Difração, Astronomia

ABSTRACT

The teaching of physical optics is one of the most neglected areas in the teaching of physics in basic education, generally summarized in the geometric study of light and based only on mathematical relationships, far from wave concepts and focused on the phenomena of reflection and refraction of light. Such treatment has deprived students of the discussion of wave aspects and phenomena arising from this interpretation.

Under the guidance of official documents such as the PCN and the BNCC, it can be said that by missing the opportunity to present content such as diffraction, interference, among others, a deficient formation is provided regarding such important phenomena within Optics. It also allows us to affirm, because they are so present in our daily lives, that we are dealing with essential themes in the training of citizens to read the technologies and phenomena that surround them.

With the intention of contributing to alleviate this problem, this work focuses on two strategies to face this problem. The first of these is the proposal for an experimental activity, since the idea that the use of experimental activities is a fundamental element in science education is already consolidated, and with significant results presented in the literature. The second is to present this proposal in a contextualized way to a problem strongly linked to Astronomy, since this area has a potential to attract attention and develop students' imagination.

Thus, the present work offers an educational product proposal that explores the problem of the power of angular resolution from the perspective of Rayleigh's criterion. Seeking to offer high school and higher education teachers an alternative of contextualization in the study of light diffraction, a phenomenon related to the limiting factor of our ability to resolve nearby light sources, such as car headlights on a road, binary stars, nearby galaxies in the celestial plane, planets with satellites, planetary rings, among others. From this last contextualization, a very rich motivation for presenting the problem of resolution, with a great and natural appeal to students.

With the objective of, through this proposal, contributing to change the scenario of teaching Physical Optics in basic education, I present in this work results of several applications of the proposed methodology, carried out at the middle and higher education levels. Having as main focus the public of the high school in two educational institutions, one of the private network and another one of the public network of the state of Bahia.

Key words: Rayleigh Criterion, Resolution, Diffraction, Astronomy

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

No documento mais recente que norteia as competências a serem desenvolvidas em cada ano da Educação Básica do nosso país, a Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2017), assim como em documentos anteriores e mais gerais como os Parâmetros Curriculares Nacionais (Brasil, 2006), já é bem consolidada a ideia de que o ensino de ciência no nível básico tem por objetivo preparar o estudante para a compreensão dos fenômenos naturais cotidianos. Uma postura que visa formar um cidadão capaz de compreender, investigar e intervir de forma positiva nas situações científicas e tecnológicas que o cercam diariamente. Nesse sentido, segundo o PCN+:

“... mesmo os jovens que, após a conclusão do Ensino Médio, não venham a ter mais qualquer contato escolar com o conhecimento em Física, em outras instâncias profissionais ou universitárias, ainda terão adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem.” (PCN+, p.59)

Sob essa perspectiva, deseja-se que o egresso do ensino básico seja capaz de utilizar as competências desenvolvidas em sua formação para compreender os fenômenos naturais e tecnológicos; ou pelo menos, compreender a natureza dos fenômenos observados, sendo capaz de identificar e correlacionar os possíveis princípios envolvidos em uma dada situação.

Neste contexto, temos interesse em destacar dois dos seis temas estruturadores do PCN para o estudo da Física, propostos com o objetivo de organizar os conteúdos do ensino de Física no nível básico. São eles, os temas “Som, Imagem e Informação” e “Matéria e Radiação”. Dentro dessa temática, reside um dos conteúdos de enorme aplicabilidade na natureza, a Ondulatória. Uma grande área da Física com um aparecimento recorrente em diversas ocasiões, e responsável pelo entendimento de muitas das situações vivenciadas no dia-a-dia.

Os inúmeros fenômenos ondulatórios vão desde a propagação das ondas na superfície de líquidos, ondas sísmicas de um terremoto até o estudo de fenômenos astronômicos nas frequências de rádio e raios-x. Estando presente em áreas do conhecimento e em estudos essenciais para o desenvolvimento da nossa civilização, manutenção da vida e possibilitando o desenvolvimento tecnológico, que sob esse ponto de vista, somente foi possível graças ao transporte da informação pelo som e por todo espectro eletromagnético (VICENZI, 2007).

Nossa percepção do mundo é fundamentalmente baseada em nossos sentidos, o tratamento empírico da Ciência e da realidade nos diz que todo e qualquer conhecimento advém unicamente da experiência, e tem como limite máximo, o que pode ser captado pelos nossos sentidos. Contudo, por vezes somos traídos pelos mesmos, isso pelo simples motivo de termos um limite de percepção em cada um dos nossos sentidos, ou ainda, pela natureza de alguns dos fenômenos físicos do nosso cotidiano ser muito evidente.

Neste sentido, o presente trabalho se debruça particularmente sob um deles, a visão, mas valendo ressaltar um segundo sentido corriqueiramente relacionado com a nossa percepção de fenômenos ondulatórios, a audição. Para grande parte dos estudantes, ler sob a relação da audição com um fenômeno de natureza ondulatória – como o “som” – é algo que não gera nenhum espanto ou desconforto, pois é recorrente na mídia a presença de expressões que tratam o som como um fenômeno de natureza ondulatória, como na expressão “ondas sonoras”. Mas é difícil reconhecer em expressões cotidianas a valorização e destaque da natureza ondulatória da luz, fugindo ao grande público o conhecimento dessa característica. Onde prevalecem expressões tais como, “os raios luminosos” ou “feixe de luz”, que dificilmente remeteriam a uma interpretação ondulatória desse fenômeno, ou ainda, expressões que podem gerar facilmente uma interpretação dúbia ou equivocada, como “o som viajando nas ondas do rádio”.

Expressão que pode levar o ouvinte despreparado a uma correlação errônea da onda de rádio como uma onda de natureza mecânica, correlacionando-a com uma onda sonora ao invés de uma onda de natureza eletromagnética transmitida pela antena das estações de rádio. Espera-se então que o ensino básico, tendo em vista os seus objetivos para o ensino de Ciências (Brasil, 2006), tenha uma postura que vá de encontro às concepções do senso comum, formando um cidadão capaz de reconhecer e compreender de maneira assertiva o mundo que o cerca.

Em específico este trabalho se debruça sobre a concepção do grande público a respeito dos fenômenos ondulatórios, uma área que no ensino médio encontra seu lugar apenas sob um tratamento matemático e rígido. E que apesar da importância e expressiva presença dos fenômenos ondulatórios na natureza – como na interferência, difração e polarização – tem a sua abordagem no ensino médio ainda incipiente, não tendo espaço concreto nos currículos escolares (VICENZI, 2007).

Tal proposta vai de encontro do que sugerem as orientações de documentos oficiais para o currículo do ensino médio, como enfatizado no trabalho de Gicoreano & Pacca (2001) – a Óptica – uma área da Física fortemente influenciada sob a perspectiva dos fenômenos ondulatórios, quando ensinada no ensino médio, abre mão dessa interpretação. Dando ênfase a solução de problemas por meio do tratamento corpuscular da natureza da luz e dando foco a aspectos geométricos,

baseados no conceito de raio de luz e utilizando elementos como espelhos, lâminas de faces paralelas, prismas e lentes. Sempre considerando uma propagação retilínea e os elementos como pontos num plano, sem evidenciar que a luz se propaga num espaço tridimensional e que podem haver obstáculos na sua direção de propagação.

Sem se dar conta de que ao desconsiderar parte dos aspectos ligados à natureza da luz, sua interação com a matéria e sua ligação com o processo de visão, constroem uma prática metodológica que não favorece o aprendizado. Tendo em vista as concepções prévias dos estudantes sobre a luz e sua natureza, como evidenciado no trabalho *“Young children's (7-11) ideas about light and their development”* de Osborne & Black (1993), o qual demonstra o quanto as concepções alternativas ao entendimento formal da propagação da luz são corriqueiras. Assim sendo, Gicoreano & Pacca reafirmam que:

“... o ensino da óptica, desvinculado dos aspectos físicos ligados à natureza da luz e ao processo de visão acaba não só tornando o aprendizado mais difícil como também pode reforçar muitas das concepções espontâneas e proporcionar aos estudantes uma apreensão incorreta dos conceitos cientificamente aceitos” (GICOREANO & PACCA, 2001).

Posso afirmar então, que ao privar os alunos da informação de que grande parte dos fenômenos ópticos vivenciados no seu cotidiano não se resumem, ou não são explicados apenas a partir de uma mera geometrização, estaria oferecendo aos estudantes uma visão equivocada do mundo, e proporcionando uma formação deficiente, como indicado também por (ALBUQUERQUE et al. 2015).

O estudo e compreensão da Óptica é, desse modo, indissociável do estudo e compreensão dos fenômenos ondulatórios, visto que, a própria concepção dessas áreas de estudo foi feita a partir da superação de fortes paradigmas na história da Ciência, que até hoje são verificados nas concepções prévias dos alunos. Desse modo, a discussão inerente ao estudo de qualquer fenômeno óptico deveria encontrar correlação física e histórica com os conteúdos da ondulatória. Por meio do contraponto entre a concepção ondulatória, sistematizada pelo holandês Cristiaan Huygens (1629-1695) – também conhecida como Óptica Física – com a concepção corpuscular defendida, em seu tempo, por Isaac Newton (1642-1727) – também conhecida como Óptica Geométrica (SILVA, 2007).

Na educação básica, mais especificamente na disciplina de Física, o estudo da Óptica é apresentado também subdividido em “Óptica Geométrica” e “Óptica Física”. A Óptica Geométrica parte de uma concepção corpuscular, analisando os fenômenos sob uma perspectiva geométrica, estudando-os a partir de princípios, como o princípio de reversibilidade, da propagação retilínea e da independência dos raios luminosos;

utilizando elementos geométricos, como espelhos planos, esféricos, prismas, lentes e lâminas de faces paralelas para o estudo dos fenômenos ópticos. Esse tratamento tem suas limitações, e podem ser facilmente alcançadas ao propormos questionamentos como na seguinte situação – *“Se a luz se propaga de forma retilínea, porque ao passar um feixe luminoso de raios paralelos por uma fenda na parede, a luz parece se separar ao sair dela, perdendo seu paralelismo inicial?”* – O tratamento puramente geométrico não dá conta de responder porque regiões onde deveria existir apenas sombra, são preenchidas pela luz numa situação como essas.

Nesse momento a Óptica Geométrica dá lugar a Óptica Física, é ela a responsável por explicar por meio do tratamento ondulatório da luz, os fenômenos de natureza intrinsecamente ondulatória, como a difração, a interferência ou ainda a refração de ondas – que guardam similaridades com o tratamento geométrico. Como destaca Gaspar:

“...o conhecimento da óptica ondulatória é essencial, sobretudo para a compreensão das ideias da física moderna. Por exemplo, a experiência da fenda dupla de Young é básica para a compreensão do enigmático caráter dual da luz.” (GASPAR, 2004, p.155).

Contudo, dentro dos sistemas de educação podemos perceber que o tratamento dos fenômenos ondulatórios, incluindo natureza ondulatória da luz, é pouco explorado, quer seja para o estudo da Física Moderna ou para fins clássicos, mesmo já estando demonstrada a importância da compreensão desses fenômenos. A questão que nos advém nesse momento é – *Porque mesmo sendo clara a importância da compreensão desses fenômenos em nossas vidas, os fenômenos ondulatórios ainda são negligenciados no ensino básico?* – E em especial, os fenômenos da difração e interferência.

De acordo com o trabalho de Vicenzi (2007) sobre a “Difração e Interferência para Professores do Ensino Médio” as barreiras que impedem o professor da disciplina de Física a trabalhar com tais conteúdos, previstos no PCN, encontra-se debruçada sobre dificuldades teóricas por parte dos professores com o conteúdo. Em seu trabalho, Vicenzi traz como exemplo a conclusão extraída por uma proposta de Galli & Salami para a construção de um experimento de baixo custo para registro de figuras de difração da luz em papel fotográfico. Da qual, extraímos o seguinte trecho:

“Constatamos, através de depoimentos, de vários professores de Física de escolas de Ensino Médio, que o ensino de óptica, incluindo fenômenos de difração e interferência da luz não é devidamente considerado. Acreditamos que isso pode ocorrer

pelas dificuldades teóricas que envolvem o assunto...” (GALLI & SALAMI, 1999, p. 242).

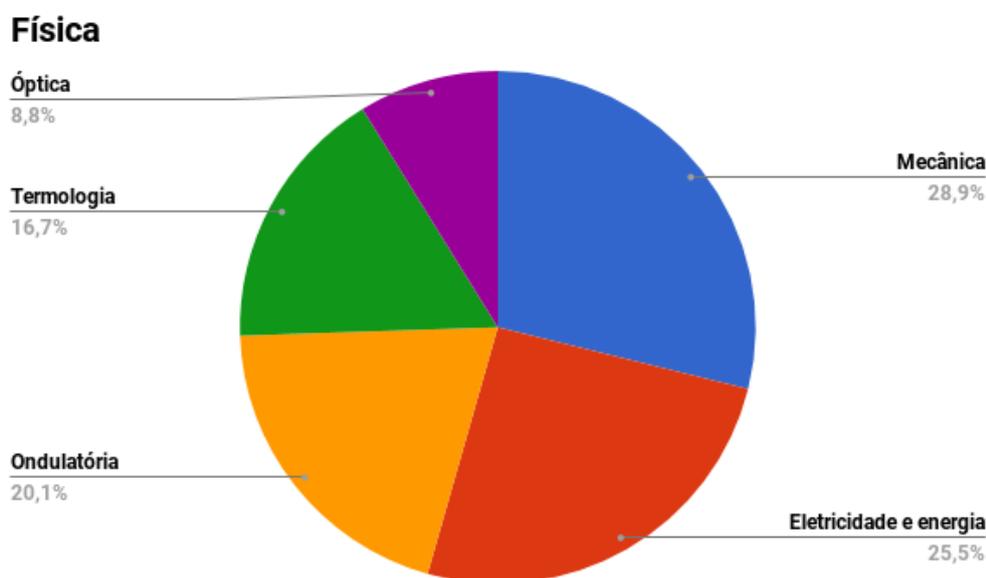
A conclusão dos autores citados anteriormente – ainda de acordo com o trabalho “Difração e Interferência para Professores do Ensino Médio” – ocorre com o estudo dos fenômenos ondulatórios pois:

“... os professores não gostam desse assunto e procuram evitá-lo. Muitos argumentam que não é importante porque nem os vestibulares e nem a maioria dos livros didáticos lhe dão destaque” (GASPAR, 2004, p. 155).

É sugerido ainda, que essa deficiência no ensino de Física na escola está envolvida com o fato do professor dispor de pouco tempo disponível para a disciplina, variando entre duas ou três aulas de 50 minutos semanais. Somados a vasta gama de conteúdos a serem superados pelo professor neste período, obrigando-o a dar preferência a alguns conteúdos em detrimento de outros. Escolha que muitas vezes é feita privilegiando os mais simples em termos da teoria envolvida, ou os mais acessíveis experimentalmente, uma vez que muitas escolas que não dispõem de laboratório didático para realização de experimentos ou de informática para utilização de simulações computacionais (VICENZI, 2007).

Um cenário que necessariamente precisa ser mudado, pois como evidenciado, a formação de um estudante com déficits, que incluem o pouco ou quase nulo conhecimento a respeito dos fenômenos de interferência e difração pode afetar negativamente no seu processo de formação como cidadão. E mesmo se negligenciarmos o trabalho desses temas em sala, usando a justificativa dos professores que aparecem no relato de Galli e Salami (1999) – que tais conteúdos seriam pouco cobrados nos exames vestibulares – não teríamos aqui uma justificativa atual. Visto que, o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), que é massivamente utilizado para ingresso no nível superior de ensino, obedecendo os parâmetros curriculares nacionais, tem demonstrado um expressivo número de questões que envolvem fenômenos ondulatórios. Como mostrado em um levantamento dos conteúdos mais presentes nas provas no ENEM de 2009 até 2017 feito pela revista “Guia do Estudante” (Ver Fig. 1). E para além disso, têm trazido questões específicas contemplando os conteúdos de difração, polarização e interferência da luz e do som nos últimos anos da prova.

Figura 1 - Conteúdos mais recorrentes da Física ENEM entre os anos de 2009 a 2017. Evidenciando uma alta demanda dos conteúdos ligados ao estudo da ondulatória.



Fonte: (GE/Guia do Estudante¹) (2018).

Tendo consciência do cenário encontrado, sob o ensino da Óptica Física no ensino médio, é válido nos questionarmos sobre como poderíamos contribuir para a mudança desse cenário. Que por vezes parece infinitamente maior que nós, e extremamente desafiador quando encaramos o problema da motivação e interesse dos estudantes no processo de ensino-aprendizagem das Ciências.

No que diz respeito ao enfrentamento desses desafios, muito se tem pesquisado sob duas frentes principais, as quais utilizarei como agentes motivadores, para o desenvolvimento de uma proposta para enfrentar essas dificuldades encontradas no ensino da difração.

A primeira ferramenta para o enfrentamento dessas dificuldades é a inserção das atividades experimentais na sala de aula. Em seu trabalho, Bizzo (1998) afirma que a aprendizagem de ciências é difícil quando os alunos não entendem determinadas afirmações, mesmo que estas apareçam impressas em livros didáticos, fazendo-se necessário uma abordagem experimental para a contextualização da teoria. Senta direção, o uso das atividades experimentais tem apresentado resultados no ponto de vista de despertar o interesse e a curiosidade do aluno – como evidenciado no trabalho de Villani (2002) – que indica que os alunos reconhecem as atividades experimentais como oportunidades motivadoras que exploram os seus sentidos e potencializam a forma de pensar científica. Contribuindo para a formação

¹ Disponível em: <<https://guiadoestudante.abril.com.br/estudo/veja-os-conteudos-mais-cobrados-no-enem-nos-ultimos-8-anos/>>

de um cidadão consciente e participativo, como preconiza os PCN, e ainda mais recentemente a BNCC.

Contudo, apesar de ser nítida a necessidade das atividades experimentais no ensino médio, vivenciamos um cenário onde as aulas de ciências têm baixa ou quase nenhuma presença de atividades experimentais. Caracterizando assim, a necessidade de uma proposta experimental como um ponto chave neste trabalho, que visa apresentar um produto educacional de cunho experimental, explorando tal potencialidade e contribuindo no enfretamento dessa realidade.

A segunda oportunidade para superação das dificuldades no ensino de ciências, em específico da Física, é gerada pelo uso da Astronomia como agente motivador e área de contextualização. Sendo consolidada na literatura a ideia da Astronomia como um agente motivador para o ensino de ciências, uma vez que esta área desperta facilmente a curiosidade e alimenta o imaginário dos estudantes desde cedo, como indica o trabalho de Langui & Martins (2018).

Neste sentido, a correlação da Óptica Física com a Astronomia é quase gritante, podendo ser utilizada como suporte motivacional para o aprendizado, respeitando a importância da abordagem dos conteúdos de Física de forma prática como defendido por Moreira & Masini (1982).

Contudo, embora a proposta do uso da Astronomia apresente um grande potencial motivador para o ensino de ciências, trabalhos como o de Siemsen & Lorenzetti (2017) sobre pesquisas em ensino de Astronomia, levantaram que num universo de 106 trabalhos distribuídos entre 2005 e 2016, apenas 27 foram voltados para o ensino médio. Constituindo um cenário onde se abre mão dessa poderosa ferramenta motivadora que é Astronomia no imaginário dos estudantes.

Uma realidade preocupante que deve e vem sendo enfrentada por alguns trabalhos, cabendo destaque a algumas iniciativas que apresentam uma proposta de ensino de Física contextualizada à Astronomia, ou vice-versa. Que aprecem por exemplo no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), dentre elas trabalhos como os de Damasceno (2016), Vasconcelos (2018), Silva (2019), Vidigal (2019), entre outros. Assim como os produtos do Mestrado Profissional de Ensino de Astronomia (MPASTRO-UEFS) em estudos como os de Vieira (2019), Santos (2019), Filho (2017), entre outros destes programas com a mesma iniciativa. Constituindo deste modo um cenário sob o qual o presente trabalho também visa contribuir.

As duas oportunidades citadas nos parágrafos anteriores assim como o cenário apresentado consolidam um solo fértil para a apresentação da proposta deste trabalho. Que tem por objetivo principal desenvolver um estudo sobre o critério de resolução de Rayleigh, assim como oferecer como produto didático uma proposta

experimental roteirizada para o professor interessado em desenvolver uma atividade sobre o tema. Atividade esta que foi desenvolvida com o foco no ensino médio, mas que pode ser facilmente utilizada em outros níveis de ensino para contextualização da difração. Visando por meio dela, explorar as potencialidades citadas anteriormente, onde sob a perspectiva da Astronomia podemos explorar o problema do poder da resolução angular contextualizado à resolução em telescópios. Analisando-o sob o critério de resolução de Rayleigh, parâmetro que mantém uma relação direta com o tema da difração e pode contribuir no desenvolvimento dos conteúdos correlatos no estudo da ondulatória.

Isto posto, o presente trabalho apresenta-se dividido em seis capítulos, no próximo capítulo o Capítulo dois, descreve os fenômenos ondulatórios com interpretação do ponto de vista da Óptica Física. Apresentando ao final de cada um deles alguns dados sobre trabalhos experimentais publicados em revistas nacionais de ensino de Física com a intenção de localizar a proposta experimental deste trabalho no contexto de outros fenômenos ondulatórios explorados na educação básica.

No Capítulo três apresento o problema da resolução angular na Astronomia, primeiramente sobre os aspectos que influenciam a qualidade da imagem no seu caminho até os telescópios, fatores que independentemente dos elementos do critério de Rayleigh podem comprometer a resolução da imagem. Em seguida apresento o critério de Rayleigh em suas variáveis, elementos importantes e interpretações, apresentando ao final deste capítulo um levantamento sobre propostas didáticas envolvendo o critério de Rayleigh, culminando na apresentação de um kit que permitirá ao estudante o contato com esse problema.

O Capítulo quatro sintetiza a metodologia de realização deste trabalho, posicionando o estudo do critério em uma sequência de aulas para o nível médio, que preparam os estudantes para o contato com o problema da resolução e apresenta a proposta metodológica para determinação do critério de Rayleigh.

Chegando então ao Capítulo cinco que apresenta os resultados deste trabalho, com a apresentação dos resultados e análise dos testes, e dos resultados quantitativos obtidos para o valor do poder de resolução do olho humano, obtido nas diversas aplicações do roteiro, que demonstram a eficácia do método proposto.

Por fim o Capítulo seis traz a conclusão do trabalho, no qual são feitos alguns comentários sobre os resultados, dificuldades enfrentadas e a análise desses resultados diante o objetivo proposto para o trabalho.

CAPÍTULO 2 – FENÔMENOS DA ÓPTICA FÍSICA E AS PROPOSTAS EXPERIMENTAIS NO ENSINO MÉDIO

Neste capítulo farei uma introdução conceitual dos fenômenos ondulatórios da luz em um tratamento matemático simplificado, objetivando a ilustração do nível de profundidade do conteúdo a ser contemplado no nível básico de ensino. Preferencialmente, utilizando a literatura desse mesmo nível para referenciar a parte teórica, a qual é de fácil acesso a professores deste nível, e posicionando cada um destes fenômenos no cenário de iniciativas experimentais já apresentadas em revistas nacionais de ensino.

Vale ressaltar que a escolha dos fenômenos ondulatórios a serem tratados neste capítulo foi feita dando preferência aos fenômenos ondulatórios diretamente ligados à Óptica Física/Geométrica. Deste modo, são contemplados nesta breve revisão os fenômenos da reflexão, refração, polarização, interferência e por fim difração.

Tendo ciência de que o foco deste trabalho são as ondas eletromagnéticas, uma vez que temos como objeto de estudo o poder de resolução. Mas utilizamos algumas vezes quando possível ou necessário para exemplificação, uma correlação com as ondas mecânicas.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS

Antes de tratarmos sobre alguns fenômenos de natureza ondulatória, convém discutirmos a respeito da classificação das ondas, haja vista a necessidade desta classificação para compreender alguns dos fenômenos que serão descritos. Esta classificação será subdividida em duas frentes, a serem discutidas a seguir:

2.1.1. Classificação quanto a natureza da onda

A primeira classificação das ondas é quanto a natureza da onda, ou o meio de propagação. Nesta visão subdividimos as ondas em dois tipos, as ondas mecânicas e as ondas eletromagnéticas.

As ondas mecânicas, a exemplo das ondas que se propagam na superfície dos líquidos, numa corda, no ar ou até mesmo numa mola são ondas que podem ser definidas como aquelas que necessitam de um meio material para se propagar, uma vez que se transportam pelo espaço por meio da perturbação que geram no meio material, transpondo energia e quantidade de movimento (SAMPAIO & CALÇADA, 1998, p.307).

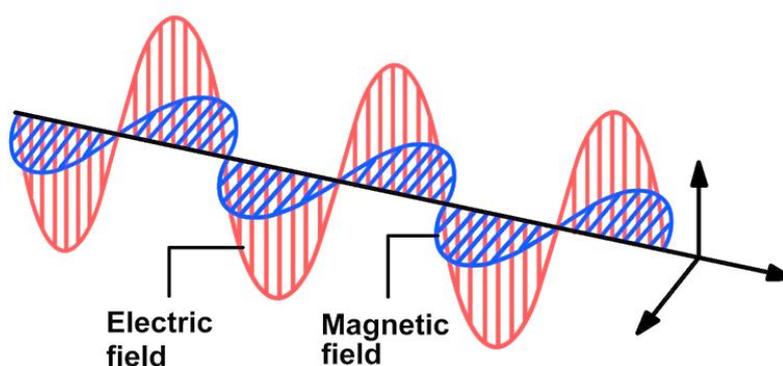
Figura 2 – Onda mecânica se propagando na superfície de um líquido.



Fonte: (FlexBooks²) (2020).

Já as ondas de natureza eletromagnética, como o próprio nome já sugere, são a composição de dois campos variáveis e perpendiculares entre si, um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} que viajam simultaneamente pelo espaço sem a necessidade de um meio material, como ilustrado na Fig. 3 (SAMPAIO & CALÇADA, 1998, p.337). São exemplos de ondas eletromagnéticas as ondas de rádio, raios-x, luz visível, entre outras.

Figura 3 – Representação de uma onda eletromagnética com os planos de oscilação do campo elétrico (nesta figura, vertical) e do campo magnético (nesta figura, horizontal).



Fonte: (JustScience³) (2017).

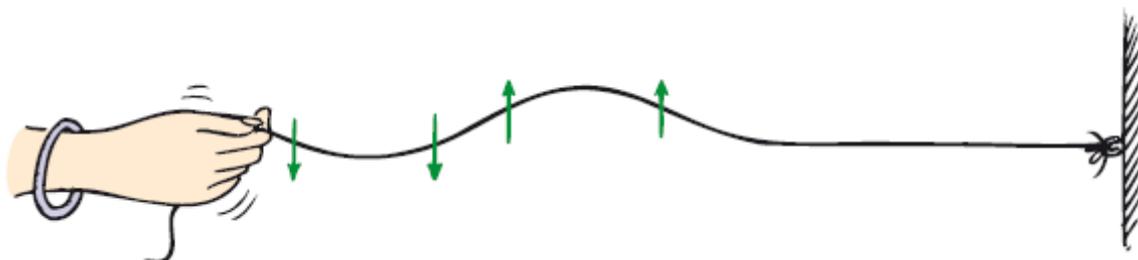
² Disponível em: <<https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-middle-school-physical-science-flexbook-2.0/section/16.1/primary/lesson/mechanical-wave-ms-ps>>

³ Disponível em: <<http://www.justscience.in/articles/applications-of-electromagnetic-waves/2017/05/25>>

2.1.2. Classificação quanto a forma de propagação da onda

Uma outra classificação das ondas aparece quando observamos as diferentes maneiras de gerar um(a) pulso/perturbação em uma corda ou mola, mas que vale tanto para ondas mecânicas quanto eletromagnéticas. A primeira delas está representada na Fig. 4., e se trata de uma onda transversal, uma onda que vibra em um plano transversal à direção de propagação (HEWITT, 2015, p.361). São exemplos desse tipo de onda as ondas na superfície de líquidos ou ondas numa corda.

Figura 4 – Onda transversal gerada em uma corda.



Fonte: Física Conceitual. 12ª ed. Pág. 361. Editora Bookman, Porto Alegre. 2015

Outra forma de gerar uma onda seria se causássemos uma vibração ao longo da direção de propagação ao invés de perpendicular a ela. Neste caso, utilizando uma mola conseguimos produzir ondas longitudinais, onde a vibração se dá ao longo da direção de propagação, ver Fig. 5 (HEWITT, 2015, p.361).

Figura 5 – Onda longitudinal gerada em uma mola por meio de uma vibração ao longo da mola.

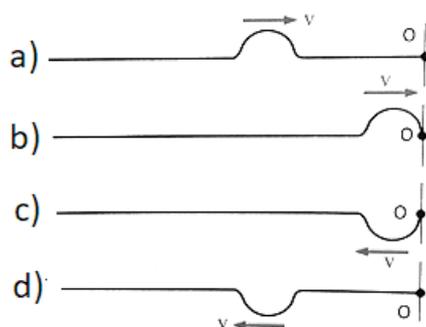


Fonte: Física Conceitual. 12ª ed. Pág. 361. Editora Bookman, Porto Alegre. 2015

2.2 FENÔMENO ONDULATÓRIO: REFLEXÃO

Se considerarmos uma onda unidimensional se propagando-se com velocidade v ao longo de uma corda presa a uma extremidade fixa O . Ao sair do seu ponto de origem, indo na direção de O , sabemos que essa onda não tem condições de ultrapassar esse ponto pela existência de um anteparo, pois ao chegar ao obstáculo ela será refletida, retornando com velocidade na direção oposta ao ponto O (Ver Fig.6).

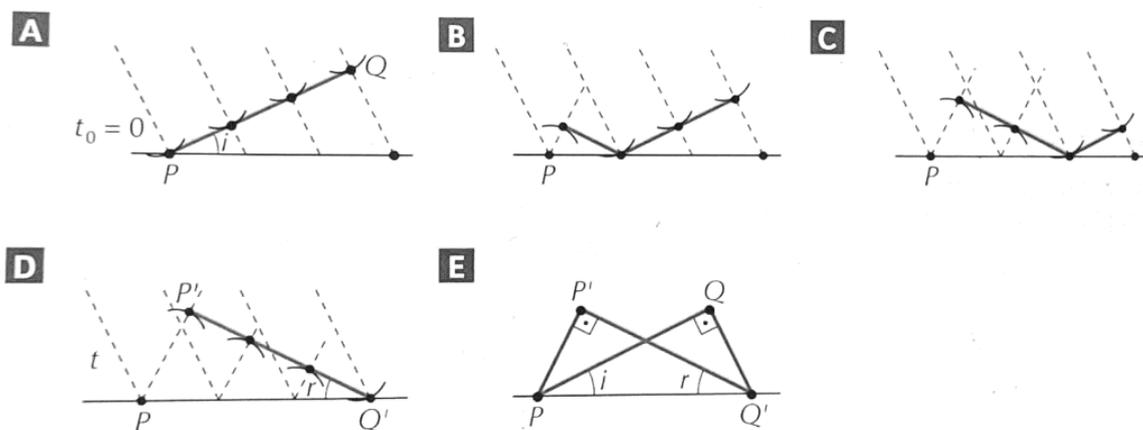
Figura 6 - Esquema simplificado representando o fenômeno de reflexão de uma onda unidimensional se propagando numa corda. Na primeira, a onda se desloca na direção de um obstáculo, na segunda e terceira, a onda encontra o obstáculo e é refletida com inversão de fase.



Adaptado de: Fuke, Carlos e Kazuhito – Os Alicerces da Física 2, 15ª ed. Pág. 354. Editora Saraiva, São Paulo. 2007

Mais interessante ainda é se tomarmos uma onda bidimensional que se propagando no espaço – como uma onda plana na superfície de uma lâmina d’água na direção de uma parede – se considerarmos essa onda plana como sendo composta por diversas “frentes de onda”, representadas entre os pontos P e Q da Figura 7. Quando o ponto P atinge o anteparo ele se comporta como se fosse uma nova fonte de uma onda secundária (Ver Fig. 7A e 7B), e a medida que as outras frentes de onda vão atingindo a o anteparo, elas também são refletidas (Ver Fig. 7 C,D).

Figura 7 - Em A, as frentes de onda incidem sob o anteparo. Chegando a B temos a reflexão da primeira frente de onda, as demais etapas, C e B representam a reflexão das outras frentes de onda. Chegando em E das frentes de onda incidente (PQ) e da onda refletida (P'Q')



Fonte: Os Fundamentos da Física. Volume 2. Ramalho, Nicolau e Toledo. 11ª ed. Pág. 464. Editora Moderna, São Paulo. 2015.

Quando analisamos o esquema da Fig. 7, podemos perceber a reflexão das sucessivas frentes de onda, como enunciado pelo Princípio de Huygens, e esquematizado na Fig. 7. Ao incidir sob os pontos do anteparo com um ângulo de incidência i , ela é refletida pela superfície, comportando-se exatamente como uma nova fonte de onda pontual. Com o decorrer do tempo, toda a frente de onda PQ se desloca na direção do anteparo e é refletida, cada frente de onda – representada pelos segmentos de reta – ao longo do tempo é refletida, chegando à reflexão completa, compondo a onda final refletida P'Q'. Vale observar, que o ângulo que o segmento PQ forma em relação ao plano de incidência (i), é matematicamente igual ao ângulo formado pelo segmento P'Q' e o plano (r). E acontece para todo fenômeno de reflexão, essa característica recebe o nome de “Segunda lei da reflexão”, e é de fundamental importância para a compreensão do fenômeno.

As atividades experimentais encontradas na literatura Brasileira sobre o fenômeno da refração – ligadas ao ensino médio –, de acordo com um trabalho de revisão bibliográfica desenvolvido por Ribeiro & Verdeaux (2012), compõe cerca de 17% dos artigos publicados dos periódicos Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ensino de Física e Física na Escola. Artigos voltados especialmente a estudos com proposta experimental para o ensino de óptica no Ensino Médio. Apesar do número, vale ressaltar, que essa porcentagem deriva de um total de apenas 8 trabalhos publicados sobre essa temática entre os anos de 1998 e 2010, o que é uma quantidade de trabalhos extremamente pequena quando

comparada ao cenário macro de atividades didáticas desenvolvidas sobre outros conteúdos da Física.

Entre os trabalhos publicados sobre o fenômeno da reflexão, levantados por Ribeiro & Verdeaux (2012) vale destacar a conclusão chegada pelos autores da revisão, de que:

“Os artigos dedicados à reflexão luminosa geralmente apresentam sugestões de experiências de baixo custo que podem ser facilmente transpostas para o cotidiano escolar. A revisão desses artigos demonstrou ainda que os autores dedicados ao estudo de experiências que envolvam a reflexão luminosa possuem uma forte preocupação com o tema da formação de imagens, tanto reais quanto virtuais” (RIBEIRO & VERDEAUX, 2012).

Em análise, os autores especulam que uma das motivações levantadas para o forte destaque nessa temática é reflexo dos livros didáticos utilizados em sala de aula, que via de regra, têm essa característica quando tratam do ensino da reflexão. Deixando de lado, temas como a definição e análise de campos visuais.

Alguns trabalhos valem ser destacados nesse período, como a atividade desenvolvida por Silveira & Axt (2001) que propõe uma metodologia utilizando da ótica geométrica para projeção da imagem do Sol em um anteparo, que possibilita uma observação segura do Sol, suas manchas e eventos como eclipses solares. Ou ainda sobre os trabalhos de Catelli & Reis (2004) e Catelli & Vicenzi (2004) que oferecem uma proposta alternativa para o estudo da reflexão da luz em espelhos curvos, utilizando objetos que não são costumeiramente relacionados com espelhos curvos nos livros didáticos, como uma xícara ou o vidro de uma lâmpada incandescente. Ademais, a obra de revisão de Ribeiro & Verdeaux (2012) deixa evidente um déficit de trabalhos experimentais voltados ao ensino da Óptica para a educação básica.

Contudo mesmo dado o seu valor e contribuição para o cenário, como se trata de um levantamento publicado em 2012, e de um recorte apenas nacional, se faz necessário para uma conclusão mais precisa sobre o cenário dos experimentos sobre reflexão, um levantamento mais profundo e atual, buscando inclusive em fontes da literatura internacional, para construção de um maior panorama em relação a esse tema.

2.3 FENÔMENO ONDULATÓRIO: REFRAÇÃO

O fenômeno da refração é também um dos fenômenos da Ótica facilmente perceptível no nosso dia a dia, é possível perceber, ao observar a imagem de uma caneta dentro de um copo com água, que a sua imagem parece deformada, ou ainda que a caneta parece “quebrada” na interface entre os meios (Ver Fig. 8). Isso é uma consequência direta do fenômeno da refração luminosa.

Figura 8 - Refração da luz em um copo com água. Dando impressão visual que a caneta estaria partida ao meio.



Fonte: Redação do Site Inovação Tecnológica⁴

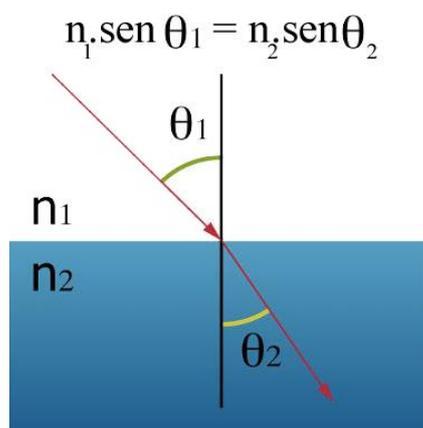
Sabemos que a luz se propaga com uma velocidade finita, que tem seu valor no vácuo igual a aproximadamente 3×10^8 km/s. Essa velocidade é constante, mas vale apenas para sua propagação no vácuo, podendo variar para um valor menor que este a depender do meio. Os meios que a luz tem maior dificuldade de se propagar – apresentando um valor menor no módulo da sua velocidade – são chamados de mais “refringentes”, enquanto os meios em que a luz tem mais “facilidade” para se deslocar – apresentando maiores valores de velocidade – são considerados menos “refringentes. Sendo assim, a razão entre as respectivas velocidades da luz (No vácuo e no meio considerado) é chamada de índice de refração (n). (FUKE et al., 2007, p.233).

Ao passar de um meio para outro, a luz tem sua velocidade reduzida ou aumentada a depender da relação entre as refingências dos meios, isso faz com que ela sofra uma mudança na sua direção de propagação, curvando-a em relação a reta normal a superfície da interface entre os meios. Essa propriedade é descrita pelas “Leis da Refração”, que são matematicamente expressas pela relação de Snell-

⁴ Disponível em: < <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=indice-negativo-refracao-metais&id=010160110908#.Xoj1tohKiiN> >

Descartes, apresentada junto com um esquema do fenômeno na Fig. 9. (FUKE et al., 2007, p.233).

Figura 9 - Esquema do fenômeno refração com as variáveis indicadas n_1 e n_2 como os índices de refração dos meios, θ_1 e θ_2 como os ângulos de incidência e refração respectivamente.



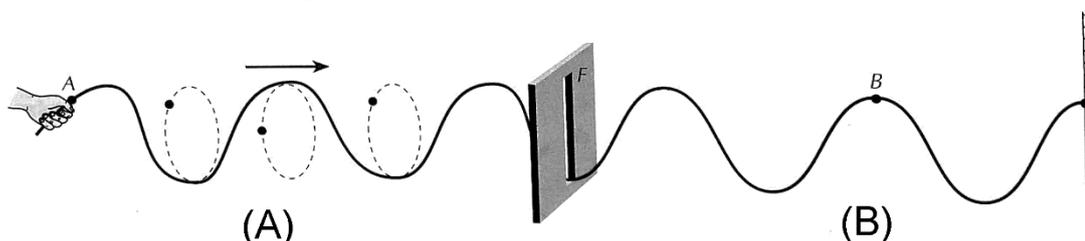
Utilizando ainda os dados da revisão de literatura feita por Ribeiro & Verdeaux (2012), no que diz respeito às propostas de atividades didáticas com experimentação dedicadas à refração da luz, temos um cenário consideravelmente maior quando comparado aos trabalhos do tema anterior: cerca de 36% dos artigos publicados nas revistas anteriormente citadas são sobre o fenômeno da refração. Contudo, com um total de artigos ainda baixo para o recorte temporal utilizado pelos autores (1998-2010), no período em questão foram publicados apenas 17 trabalhos a respeito dessa temática.

Um dos fatores levantados como causa desse número singelo de trabalhos, é a dificuldade na aquisição de material para a realização dos experimentos de óptica. Contudo, diversas iniciativas foram identificadas por Ribeiro & Verdeaux (2012) como propostas para superação dessa realidade. Podemos destacar nesse contexto, os trabalhos voltados para o entendimento do olho humano e dos defeitos de visão de Saba & Epiphanyo (2001) e Guedes & Braun (2000). Trabalhos voltados à demonstração da reflexão interna total como de Mendonça et al. (1998). A variação do grau de convergência de uma lente graças ao meio na qual ela está imersa de Pimentel (1999). A projeção de imagens por Catelli & Franco (2006), um experimento para discussão de um fenômeno envolvendo a invisibilidade de Laború & Silva (2004) e a construção de lunetas de baixo custo por Canalle & Souza (2005). Todo esse material, quando comparado a outros conteúdos da óptica, constitui uma base considerável e riquíssima para um trabalho experimental com a refração no Ensino Médio.

2.4 FENÔMENO ONDULATÓRIO: POLARIZAÇÃO

Ao sacudir uma corda com extremidade fixa, com movimentos verticais para cima e para baixo, geramos na corda uma onda transversal que se propaga ao longo da mesma. Se o plano de oscilação não varia ao longo do tempo, classificamos essa onda como polarizada. As ondas na natureza geralmente não são polarizadas, se ao invés de sacudirmos nossa corda para cima e para baixo – como proposto anteriormente – nós girássemos a extremidade da corda em um movimento circular (Ver Fig. 10A), como não há um único plano de oscilação, geraríamos uma onda “não polarizada” (RAMALHO et. al., 2015, p.470).

Figura 10 - Esquema simplificado do funcionamento de um polarizador. Em (A) gerando ondas circulares, seguido de (B) com ondas planas com polarização vertical.

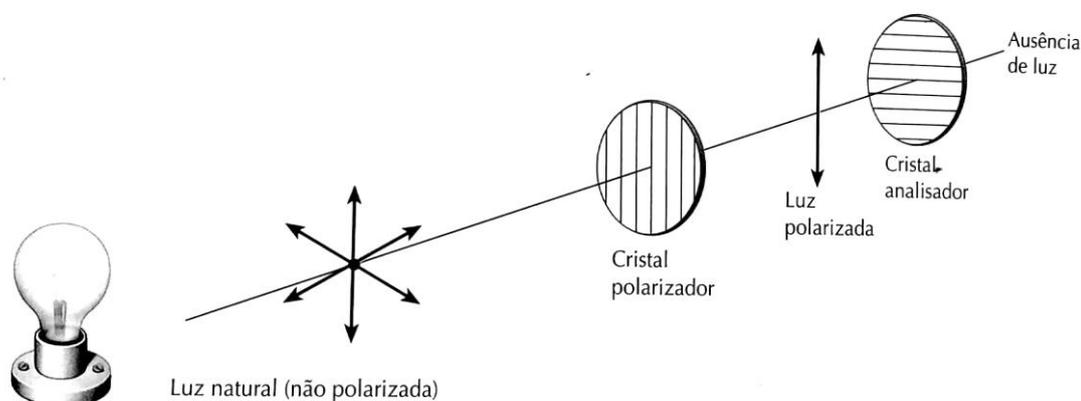


Fonte: Os Fundamentos da Física. Volume 2. Ramalho, Nicolau e Toledo. 11ª ed. Pág. 470. Editora Moderna, São Paulo. 2015.

Mas uma vez que a maior parte das ondas encontradas na natureza não são polarizadas, qual seria a maneira de obtermos ondas polarizadas? A onda gerada em (A) oscila em mais de um plano, contudo, a sua passagem por uma fenda, feita no plano vertical, faz com que somente as componentes verticais do que formam a onda consigam prosseguir, removendo as demais componentes. A este aparato é dado o nome de “polarizador”. Ondas de natureza longitudinal não podem ser polarizadas, uma vez que não há um plano de oscilação perpendicular, e a vibração tem a mesma direção da velocidade, todas as ondas conseguiriam atravessar a fenda da Fig. 10 sem nenhuma modificação em suas características.

Contudo, o que aconteceria na passagem de uma onda transversal totalmente polarizada por um polarizador com uma orientação diferente? A Fig. 11 exemplifica uma situação como essa, ao passar luz natural (não polarizada) sucessivamente por dois polarizadores em planos perpendiculares.

Figura 11 - Esquema simplificado da passagem de luz natural (não polarizada) por dois polarizadores com planos de polarização perpendiculares entre si.



Fonte: Os Fundamentos da Física. Volume 2. Ramalho, Nicolau e Toledo. 11ª ed. Pág. 471. Editora Moderna, São Paulo. 2015.

O primeiro polarizador permite a passagem apenas da luz com plano de oscilação vertical, como aparece na figura. Contudo, ao chegar ao segundo polarizador, que permite a passagem apenas da componente horizontal da onda, nenhuma luz o atravessa, sendo completamente filtrada pela ação dos polarizadores.

A abordagem desse conteúdo, é de extrema significância para o tema do trabalho, visto que a visualização das franjas do padrão de difração é intensificada ou atenuada quando utilizamos luz coerente. Como citado no trabalho “*A Montagem de Young no Estudo da Interferência, Difração e Coerência de Fontes Luminosas*”:

“Com uma fonte não puntiforme, os raios luminosos que se propagam através dos orifícios não serão completamente coerentes, o que diminuirá o contraste entre as franjas claras e escuras. Ou seja, se a diferença de fase não se mantém constante no tempo, cada valor instantâneo de determinará um quadro correspondente de interferência” (BRAUN L. & BRAUN T. 1994).

Evidenciando assim, a correlação da polarização com o conteúdo da difração, a ser explorado pela proposta deste trabalho.

Nesse sentido, os polarizadores, apesar do que pode parecer no primeiro momento, são aparelhos que aparecem frequentemente no nosso cotidiano. Apesar do desconhecimento do termo polarizador, talvez é de conhecimento do grande público o termo “Lentes Polaroides”, lentes desenvolvidas com o objetivo de diminuir a intensidade da luz e reflexo das superfícies nos olhos. A Fig. 12 traz um comparativo da observação de paisagens por meio de lentes polarizadas e lentes comuns.

Figura 12 - Comparativo da observação de ambientes bem iluminados por meio de lentes não-polarizadas (à esquerda) e lentes polarizadas (direita).



Fonte: EOtica, Lente Polarizada⁵.

Filtros polarizadores, também são de imensa aplicação na tecnologia, estando presentes em monitores de computador e telas de smartphones. Sendo fundamental também para a existência do cinema 3D como é hoje.

Mas apesar da sua vasta aplicação e presença no cotidiano, o fenômeno da polarização ainda é pouquíssimo explorado em sala de aula e nos trabalhos voltados ao ensino da Óptica. No levantamento de Ribeiro & Verdeaux (2012), apenas cerca de 7% dos trabalhos revisados exploravam didaticamente o fenômeno da polarização como estratégia para o ensino de Óptica. Algo que totaliza apenas 3 trabalhos desenvolvidos com esse enfoque num recorte temporal de 12 anos.

Na revisão Ribeiro & Verdeaux especulam que um dos motivos para a escassez de trabalhos experimentais voltados para o ensino utilizando esse conteúdo se deve ao fato de necessitar um aparato experimental que não está disponível com facilidade, embora lentes polarizadas, óculos 3D e telas polarizadas serem materiais relativamente acessíveis. Os trabalhos presentes no levantamento indicam esse fator como limitante, como os trabalhos de Laburú et al. (1998), com uma análise do funcionamento do monitor de cristal líquido. A proposta de técnica para verificação dos fenômenos de polarização por Cavalcante & Tavolaro (2006). Ou da verificação da birrefringência da fita durex por Carlin et al. (2005).

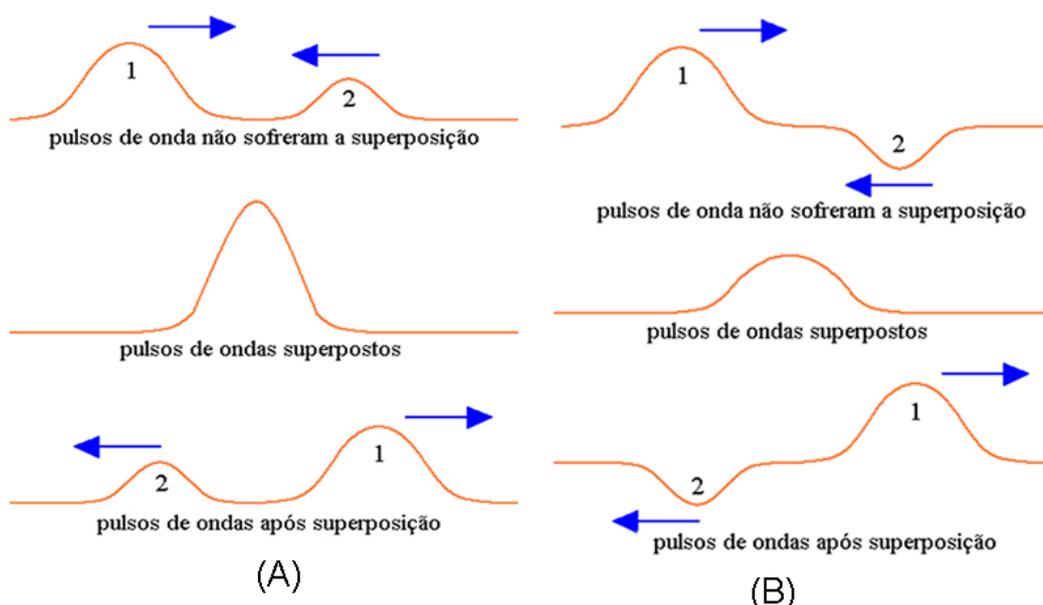
⁵ Disponível em: <<https://www.eotica.com.br/blog/o-que-sao-lentes-polarizadas>>. <Acesso em 02/03/2018>

2.5 FENÔMENO ONDULATÓRIO: INTERFERÊNCIA

Imagine-se na praia observando as ondas do mar, você pode perceber com o decorrer do tempo, que as ondas periodicamente avançam sobre a areia e retornam ao mar, em um movimento periódico e aparentemente sem fim. Contudo, em alguns momentos você pode perceber uma das ondas que retorna ao mar se encontrando com uma onda que avançam na direção da praia. Nesse momento uma interação acontece entre as ondas, algumas vezes, podemos perceber a formação de uma onda mais forte/maior, e em outros momentos, podemos perceber uma atenuação no tamanho/intensidade da onda que vem na direção da areia.

Esse evento se deve a um fenômeno da interação entre ondas, chamado de Interferência. Mas antes de abordarmos sobre a interferência, é necessário a apresentação de um princípio importante para o seu entendimento, o princípio da superposição, apresentado no trabalho de Thomas Young entre os séculos XVIII e XIX. O princípio estuda o que acontece no momento em que duas ondas se cruzam em seu caminho de propagação, tal como representado na Fig. 13:

Figura 13 - Esquema do princípio da superposição de ondas em seu caminho de propagação. Em (A) temos o resultado da superposição de ondas com deslocamentos verticais não invertidos. Em (B) temos a superposição de ondas com deslocamentos verticais invertidos



Fonte: SILVA, Domiciano Correa Marques da. "Interferência de ondas"; Brasil Escola.⁶

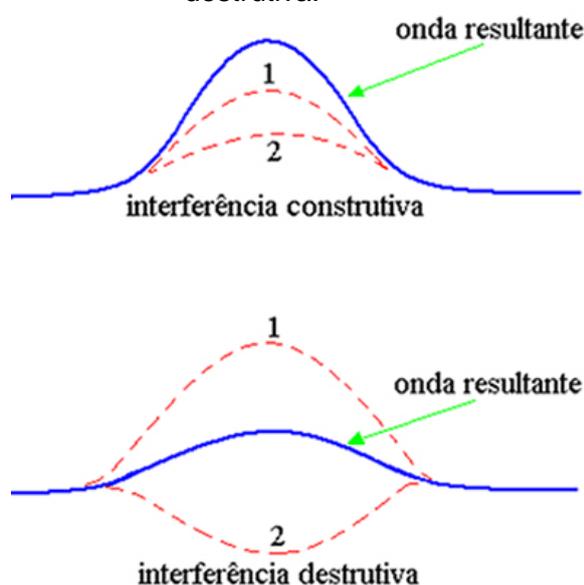
O princípio prevê que a perturbação resultante em cada ponto durante a superposição, é dado pela adição algébrica que as ondas das ondas causariam individualmente (Ramalho et al, 2015, p.486). Nesse sentido então, podemos definir a

⁶ Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm>>

interferência como o resultado da superposição de duas ou mais ondas. Por ser resultado da soma algébrica das ondas inicialmente superpostas, o resultado da interferência pode ser “construtiva” ou “destrutiva”.

Na interferência construtiva, a sobreposição das ondas gera uma única onda resultante com maior intensidade. Na destrutiva, como é de se esperar, gera uma onda resultante com menor intensidade ou ainda intensidade nula. Como ilustrado no esquema da Fig. 14.

Figura 14 - Esquema da interação entre duas frentes de onda. Gerando interferência construtiva, ou ainda destrutiva. A linha contínua indica a onda resultante, enquanto a pontilhada indica as ondas superpostas. Em uma situação de interferência construtiva e destrutiva.

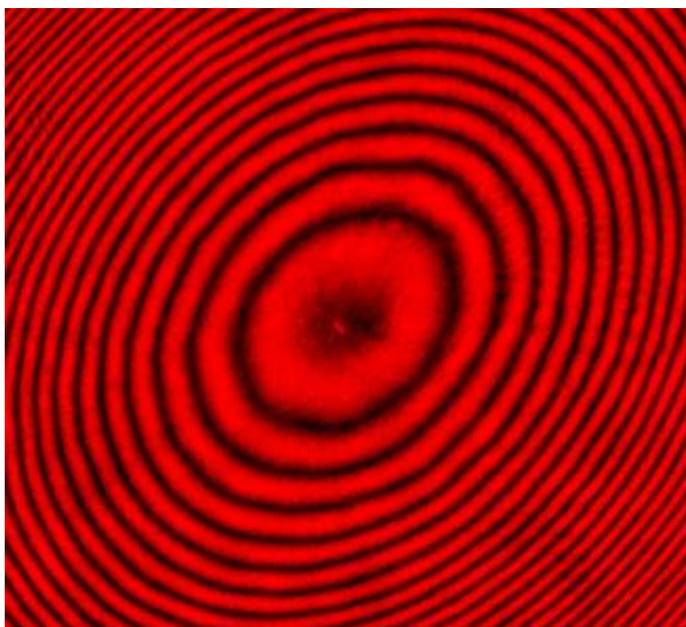


Fonte: SILVA, Domiciano Correa Marques da. "Interferência de ondas"; Brasil Escola.⁷

A interferência, como um fenômeno de natureza ondulatória, aparece em fenômenos ondulatórios de qualquer natureza, mecânica ou eletromagnética, sendo particularmente mais intrigante na interação entre ondas luminosas, gerando uma figura chamada padrão de interferência. A Fig. 15. mostra registro de um padrão de interferência formado por franjas circulares concêntricas geradas pela interferência da luz na passagem por duas superfícies reflexivas lado a lado.

⁷ Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm>>

Figura 15 - Anéis de Newton, figura de interferência que representa as áreas de interferência construtiva nos pontos claros, e destrutiva nos pontos escuros.



Fonte: Robert D. (2006) ⁸

A interferência é um fenômeno corriqueiro, e está presente em diversas situações do nosso cotidiano, explicando desde a origem das cores observadas em bolhas de sabão até as cores na superfície espelhada de um CD/DVD.

No levantamento de literatura realizado por Ribeiro & Verdeaux (2012), foi constatado que grande parte dos artigos que tratam sob o fenômeno da interferência são os que tratam sob o fenômeno da difração, por motivo de serem princípios muitas vezes correlatos em situações cotidianas. Entretanto, os artigos que tratam essencialmente da interferência totalizaram cerca de 12% dos trabalhos revisados. Foi também constatado pelos autores, um traço frequente entre os artigos dessa temática, o enfoque de experimentos de baixo custo. Entre os trabalhos revisados aparecem Silva & Muramatsu (2007), Catelli & Lazzari (2004), Catelli & Vicenzi (2001), entre outros.

⁸ Disponível em: < [https://pt.wikipedia.org/wiki/An%C3%A9is_de_Newton#/media/Ficheiro:Newton's_rings_\(650nm_red_laser_light\).jpeg](https://pt.wikipedia.org/wiki/An%C3%A9is_de_Newton#/media/Ficheiro:Newton's_rings_(650nm_red_laser_light).jpeg) >

2.5. FENÔMENO ONDULATÓRIO: DIFRAÇÃO

Sem dúvidas, a difração é um dos fenômenos ondulatórios mais presentes no nosso cotidiano, entretanto de mesma intensidade é a medida com a qual esse fenômeno é negligenciado ou compreendido nos círculos sociais, ou até mesmo em ambientes de ensino. O exemplo a seguir pertence ao campo das ondas mecânicas, mas serve bem para ilustrar o fenômeno da difração e contextualizar o tema.

Imagine uma região de baía, uma formação geográfica (Ver Fig. 16) onde uma porção do mar é rodeada pelo continente. Periodicamente, as ondas vindas de alto mar chegam até a entrada dessa região, que de forma simplificada pode ser representada como na Fig. 17. Para fins didáticos podemos supor ondas planas e paralelas se deslocando na direção do continente para explorar algumas concepções.

Figura 16 - São Martinho do Porto, uma das baías, mas bonitas do mundo. Por meio da figura, pode-se perceber a difração das ondas que entram pela baía na direção do continente.



Fonte: Joel Ribeiro (2020)⁹

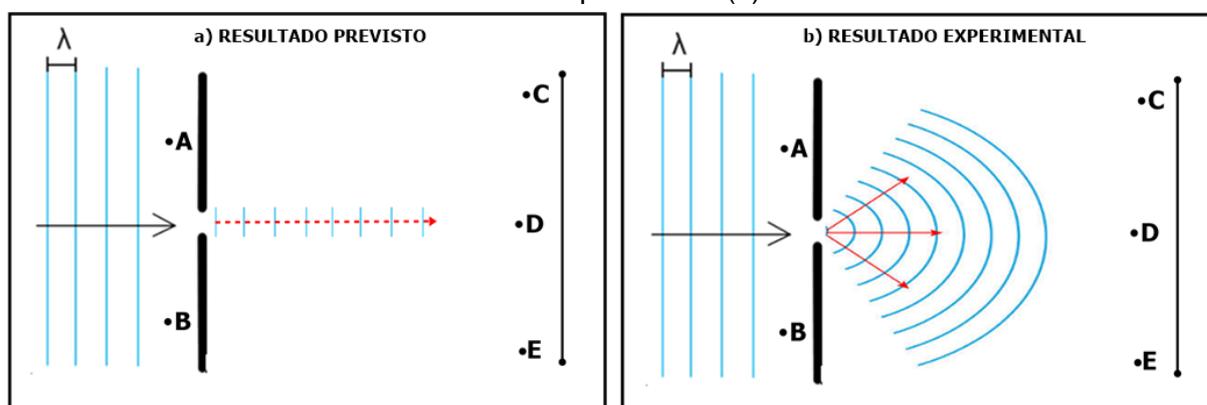
Ao observar o esquema, podemos concluir que as ondas que incidirem sobre o ponto A – região correspondente à parcela do continente – serão refletidas de volta para alto mar, o mesmo vale para as ondas que atingirem o ponto B. Contudo, seguindo essas condições, somos facilmente levados a acreditar que não devem existir ondas chegando aos pontos C e E.

⁹ Disponível em: <<https://gazetacaldas.com/coronavirus/sao-martinho-cancela-festas-de-santo-antonio/>>

Essa conclusão, de certa forma intuitiva, e presente no senso comum, facilmente poderia nos levar a afirmar que a baía reflete todas ondas capazes de chegar aos pontos C e E, permitindo a passagem apenas das ondas na direção de D. Impossibilitando a existência de ondas nas outras regiões, como representado na Fig. 17a.

Contudo, quando colocado à prova o resultado previsto – de que não haveriam ondas nas regiões C e E – o mesmo não é obtido. O resultado real, obtido por meio da experiência, é apresentado no lado direito na Fig. 17b.

Figura 17 - Esquema simplificado de ondas planas e paralelas se deslocando na direção da praia após passar por uma fenda. Comparação do resultado previsto pelo senso comum (a) com o experimental (b).

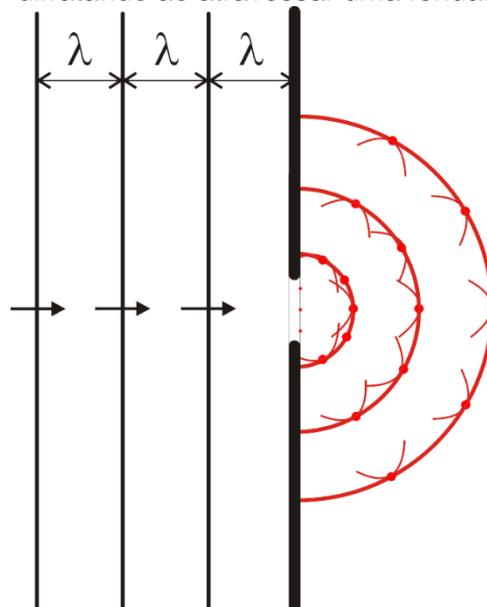


Facilmente uma pessoa na região C ou E poderia afirmar que, por alguma propriedade, as frentes de ondas que se deslocavam na direção de A e B tiveram a capacidade de “contornar o obstáculo” e chegar às suas regiões. Uma definição simplificada da difração então poderia ser escrita como sendo: a capacidade de uma onda em contornar obstáculos na sua direção de propagação.

A difração se trata de um acontecimento característico de fenômenos de natureza ondulatória. Podemos facilmente transpor a situação das ondas na baía para o domínio das ondas eletromagnéticas, quando na propagação da luz – um fenômeno de natureza ondulatória, assim como a onda no mar – a onda parece contornar um obstáculo em suas bordas ou fendas. Projetando luz e invadindo a região onde geometricamente estaria localizada a sombra (EISBERG & RESNICK, 1983).

O contraponto entre o resultado previsto e o experimental foi discutido por Christiaan Huygens (1629-1695), o qual descreveu com o que seria mais tarde chamado de “Princípio de Huygens”, que ao passar por uma fenda, a frente de onda transmitida se comporta como uma série de ondas pontuais, emitindo em todas as direções, e sendo ainda capazes de interferir entre si. Um esquema do enunciado pode ser visto na Fig.18.

Figura 18 - Esquema do Princípio de Huygens, com uma onda de comprimento de onda λ difratando ao atravessar uma fenda.



Fonte: Nicolau F. (2011)¹⁰

Um fenômeno que pode ser percebido com maior intensidade uma vez que a largura da fenda seja de dimensões próximas à do comprimento da onda (Eisberg & Resnick, 1983).

Por fim, no que tange as abordagens didático-experimentais a respeito da difração, os resultados se mostram inicialmente animadores em quantidade de trabalhos. Com um total de cerca de 22% dos trabalhos revisados na pesquisa de Ribeiro & Verdeaux (2012) tratando deste conteúdo. Contudo, vale destacar a seguinte informação, como evidenciado pelos autores, boa parte desses trabalhos apresenta uma grande dificuldade de transposição didática, principalmente para o ensino médio.

Além de dificuldades de aplicação, dada a reduzida disponibilidade de redes de difração de boa qualidade, embora, alguns mereçam destaque, por se posicionarem justamente contra essas dificuldades. Trabalhos como os de Santana & Cruz (2008), Costa (2007) e Silva & Muramatsu (2007) que utilizam CDs como redes de difração. Outros trabalhos como de Laburú & Lopes (2001), utilizam a difração em obstáculos como fios de cabelo e telas de serigrafia para determinar o diâmetro dos mesmos. Restando espaço então para propostas de abordagem da difração de maneira simplificada por meio de alguma contextualização que permita ao estudante a aproximação deste conteúdo, campo onde reside este trabalho, e será apresentado nos próximos capítulos.

¹⁰ Disponível em: < <http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2011/11/phenomenos-ondulatorios-x-borges-e.html> >

CAPÍTULO 3 – O PODER DE RESOLUÇÃO

Este Capítulo fará uma abordagem sobre o termo “resolução” no sentido da resolução angular – capacidade de distinguir a separação entre dois pontos – assim como as propriedades, fenômenos e variáveis relacionadas com este conceito.

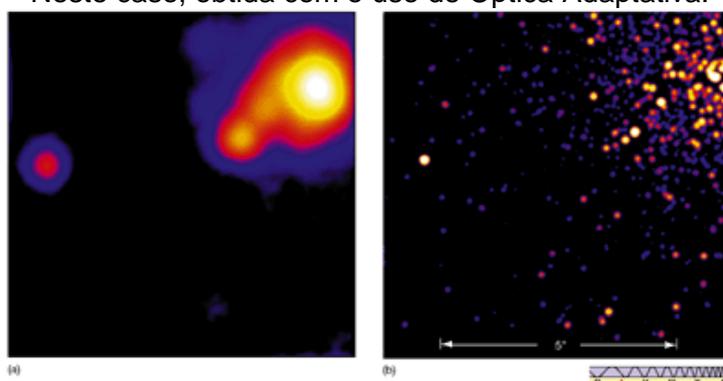
Para essa abordagem, apresento primeiramente o problema do poder de resolução associados a variáveis extrínsecas, tais como as condições do local observação, que variam de caso a caso, podendo ser maiores ou menores. E em seguida, discorro sobre o parâmetro/limite de resolução intrínseco, limitante da resolução de qualquer dispositivo óptico.

3.1 - O PROBLEMA DA RESOLUÇÃO NA ASTRONOMIA

Idealmente, como problematizado na introdução deste trabalho, o problema da perda de resolução é um problema presente em qualquer processo de observação e da formação da imagem. Algo que interfere no processo da visão e afeta na aquisição de imagens desde a Biologia/Astronomia, com o uso de microscópios/telescópios, passando por situações do cotidiano e chegando até os exames de optometria.

Mas o problema da resolução vai muito além, ele é enfrentado há muito tempo pela Astronomia, uma vez que a qualidade das imagens obtidas é de fundamental importância para o desenvolvimento dessa ciência. Um problema, que na Astronomia, não começa ou termina nos parâmetros do critério de Rayleigh, mas sim, mantém uma relação com as variáveis ligadas ao caminho que a luz percorre até chegar aos nossos olhos/sensores e com processo de formação/aquisição da imagem. Envolvendo a qualidade óptica do sistema e sua construção, condições atmosféricas e propriedades do detector. Como ilustra a Fig. 19, comparando duas imagens feitas sob condições de observação/resoluções diferentes.

Figura 19 – Ilustração de um mesmo objeto ao ser observado com capacidades de resolução diferentes. Em (a) baixa resolução, em (b) com uma maior resolução angular. Neste caso, obtida com o uso de Óptica Adaptativa.



Fonte: Chaisson/McMillan, Astronomy-4^o Ed.¹¹

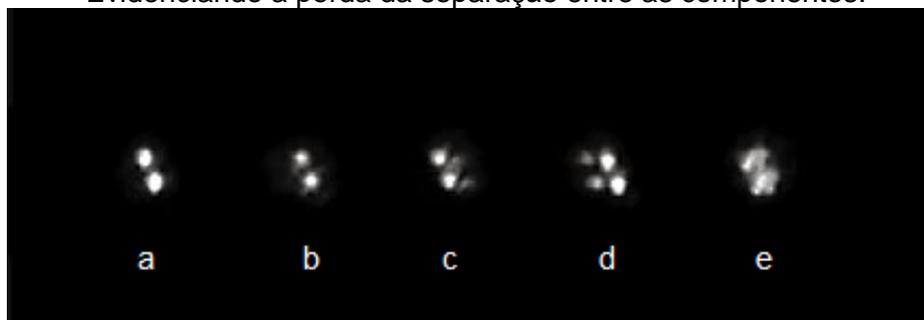
Vale então apresentar alguns desses elementos, e com eles algumas das soluções utilizadas pelos astrônomos em sua prática cotidiana antes de entrarmos no enfrentamento do poder de resolução sob a perspectiva do critério de Rayleigh.

A análise da Fig. 20 nos permite compreender melhor o problema em questão, na primeira imagem que compõe a sequência (Ver Fig. 20a) podemos perceber as duas componentes do sistema binário *Zeta Aquarii*, assim como a separação angular entre elas muito bem definida. Contudo, ao avançamos na sequência até a Fig. 20e, podemos perceber a perda crescente da capacidade de resolução. Podemos verificar a perda de resolução mesmo sem aproximação das componentes (diminuição da distância linear entre elas), nem distanciamento do observador e tampouco alteração no diâmetro do telescópio. O que poderia então, estar causando essa perda de resolução?

Nesta situação, a perda de resolução se deve principalmente à uma variação num parâmetro chamado “*seeing*”. O *seeing* ou *seeing astronômico* é um termo utilizado entre os astrônomos para quantificar um efeito atmosférico que influencia na qualidade da imagem, tendo relação com a estabilidade óptica da atmosfera (RODRIGUES,1999).

¹¹ Disponível em: <<https://web.njit.edu/~gary/202/Lecture6.html>>

Figura 20 - Imagens obtidas do sistema binário *Zeta Aquarii* (com 2" de separação) por meio do mesmo telescópio newtoniano de 200mm de abertura em diversos momentos. Evidenciando a perda da separação entre as componentes.



Fonte: Alan Adler (2006)¹²

Para fins didáticos podemos estabelecer uma correlação da estabilidade atmosférica com a seguinte situação: Imagine-se na beira de uma piscina com cerca de 2m de profundidade, ao fundo da piscina você observa uma folha de papel A4 com uma palavra escrita com o maior tamanho de fonte possível. Se a água da piscina estiver calma, sem nenhuma corrente que gere turbulências ou ondas em sua superfície, você poderia ler a palavra escrita sem muita dificuldade na superfície plana da água. Entretanto, se enchermos a piscina de banhistas, gerando turbulências e ondas na superfície, dificilmente você conseguiria ler a palavra na folha.

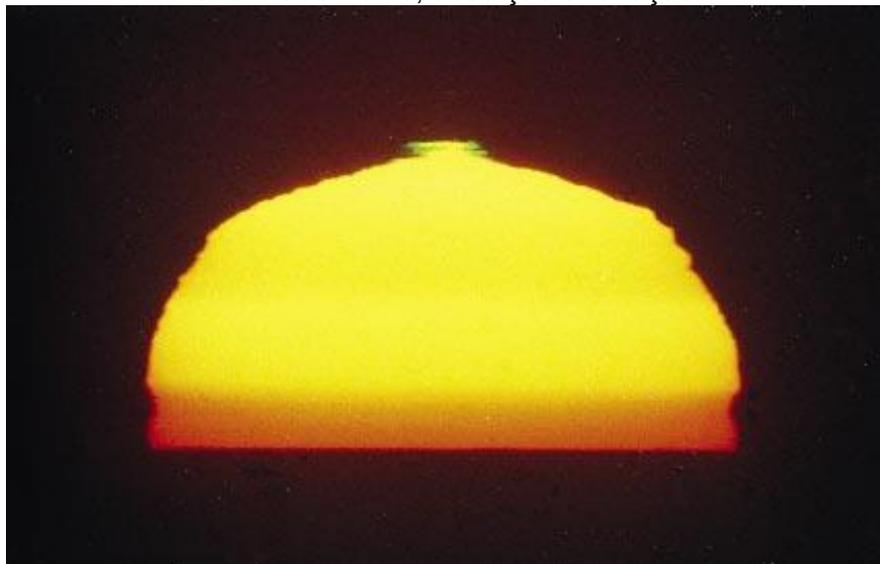
Com a atmosfera da Terra não é muito diferente. A atmosfera pode ser descrita como um fluido, o qual também está sujeito a turbulências. São essas turbulências que definem a estabilidade óptica da atmosfera e o nível do *seeing*. Um bom *seeing* permite uma boa observação, com uma boa qualidade de imagem, enquanto um *seeing* ruim é capaz de comprometer qualquer atividade de observação.

O *seeing*, que define a estabilidade óptica da atmosfera é afetado pelas diferenças de temperatura das camadas atmosféricas. Com a variação da temperatura, a densidade da camada varia, e com ela o índice de refração (n), que é o responsável por desviar a luz do seu caminho quando apresenta alteração. Isso faz com que – em se tratando de telescópios refletores – as ondas luminosas cheguem com diferença de fase nos pontos do espelho primário, secundário e no detetor. Fazendo a imagem “tremular” como por exemplo: a imagem próxima ao asfalto quente, através de uma fogueira ou saída de uma chaminé.

Desse modo, essas variações, assim como outros efeitos atmosféricos de dispersão, absorção, avermelhamento e refração são capazes de comprometer a qualidade da imagem obtida, afetando a nossa percepção, como na imagem do Sol a se pôr (Ver Fig. 21) ou o efeito de cintilação em uma estrela.

¹² Disponível em: <<https://skyandtelescope.org/astronomy-equipment/beating-the-seeing/>>

Figura 21 – Imagem feita do Sol próximo ao horizonte, sujeito aos efeitos de distorção, avermelhamento, absorção e refração.



Fonte: Marc J. (2006)¹³

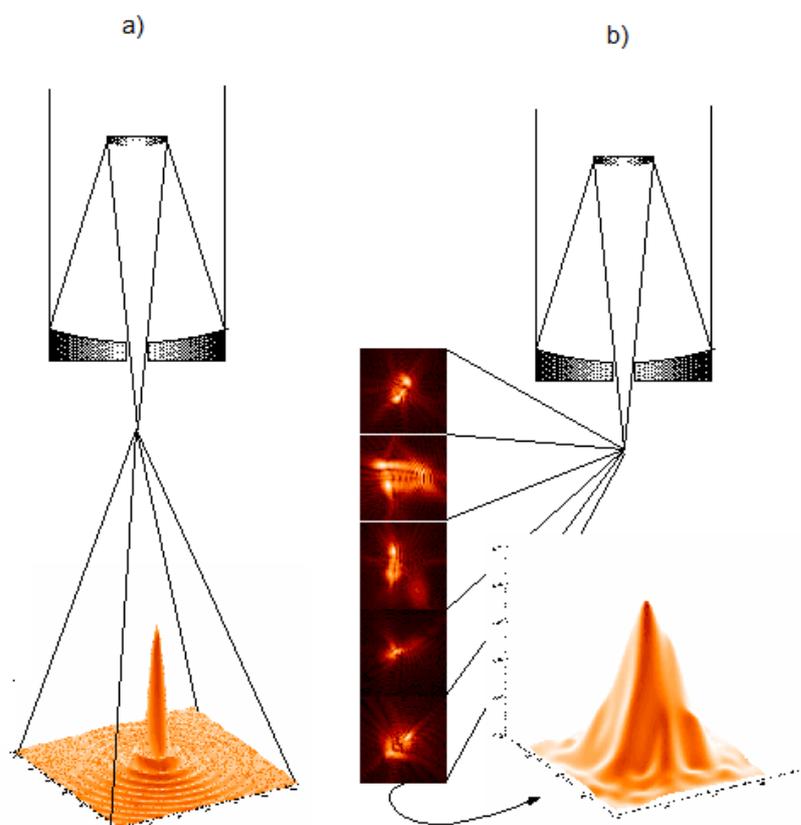
Quanto maior for a turbulência, menor é o *seeing*. Podemos dizer que temos um “*seeing* ruim” quando a imagem de uma fonte pontual se desloca continuamente no plano focal, gerando imagens distorcidas que variam a todo instante, que ao serem somadas durante todo tempo de integração do telescópio geram uma imagem com uma baixa resolução.

Em outras palavras, o *seeing* torna o limite angular de resolução dos telescópios maior que o valor definido pelo critério de Rayleigh. Numa situação ideal, sem a degradação gerada pela turbulência atmosférica, a imagem formada pelo telescópio conseguira formar um disco de difração de Airy¹⁴. Em uma ilustração feita por Olivier (1998) podemos perceber o alargamento do máximo central, saindo da condição ideal de resolução – formação do disco de Airy, ver Fig.22a – para a condição com perda de resolução, ver Fig. 22b.

¹³ Disponível em: < <https://skyandtelescope.org/astronomy-equipment/beating-the-seeing/> >

¹⁴ Disco de Airy: disco limitado pela região do primeiro mínimo do padrão de interferência por difração. A sua largura determina a resolução da imagem, que é limitada pela função de espalhamento pontual (*Point Spread Function*, PSF) (Kepler O. 2018).

Figura 22 - Comparação do padrão de interferência por difração na condição de máxima resolução (a), comparado à condição (b), com perda de resolução gerada pela turbulência atmosférica. Considerando o fluxo luminoso constante embora as figuras a e b estejam fora de escala.



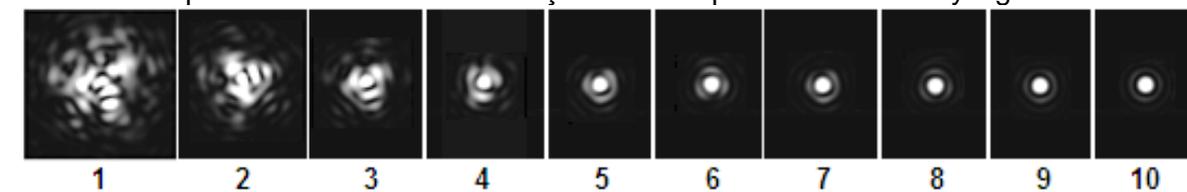
Modificado de: Adaptive Optics, Olivier (1998)¹⁵

Neste momento, vale ainda observar ainda que a melhor condição de resolução (Fig. 22a) pode não ser a ideal para a observação do objeto, pois há a possibilidade desta distribuição saturar determinados pontos do sensor prejudicando a visualização do objeto.

Uma das maneiras de quantificar o seeing, relacionando-o com a qualidade da imagem é a escala de Pickering, desenvolvida por William H. Pickering (1858 – 1938) utilizando um telescópio refrator de 127mm abertura. A Fig. 23 a seguir ilustra de ordem crescente variações condição de seeing se aproximando da condição ideal com a formação do Anéis de Airy (KEPLER. O. 2018) .

¹⁵ Disponível em: < https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/AOB/local_tutorial.html>

Figura 23 – Escala de Pickering's classificando as condições de 1 a 10, em ordem de qualidade de imagem, onde 1 representa uma imagem muito ruim e 10 uma imagem perfeita. No limite de resolução definido pelo critério de Rayleigh.

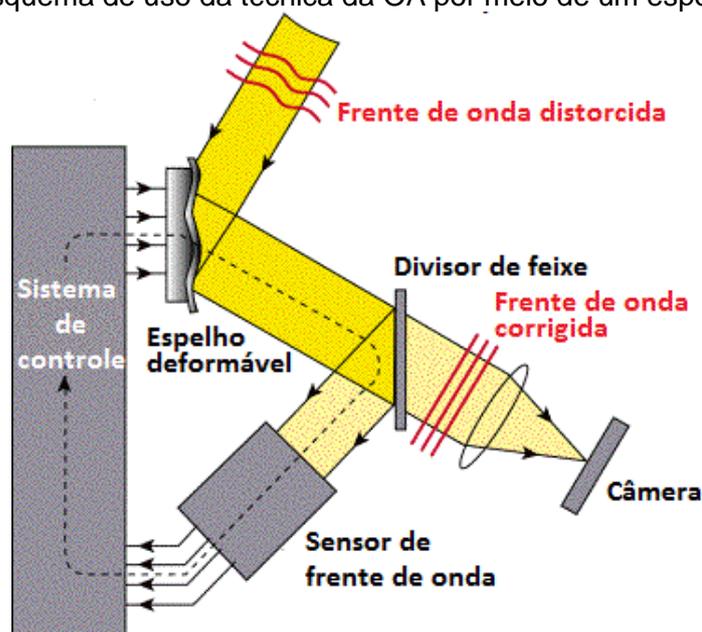


Fonte: Telescope Optics¹⁶

Efetivamente, o seeing pode ser melhorado quanto maior for a altitude, mais seco for o ar e mais afastado estivermos de cidades e da sua luminosidade. Entretanto, a resolução angular dos telescópios terrestres fica limitada por conta dos efeitos atmosféricos.

Aqui então reside a importância dos telescópios espaciais na história e no avanço da Astronomia, operar no limite máximo de resolução ao fugir dos efeitos atmosféricos quando montado em solo. Mas esta, embora seja extremamente eficiente, não é a única solução. Uma das soluções desenvolvidas para ultrapassar o limite imposto pela atmosfera antes de utilizar telescópios espaciais é o uso da Óptica Adaptativa (OA), uma estratégia na qual são medidas as distorções atmosféricas da frente de onda, e em seguida compensadas, com base nessas medidas, as diferenças de fase com uma correção usando um espelho deformável (Ver Fig.25) antes mesmo que a luz do seja captada pelo detector (RODRIGUES I.,1999).

Figura 24 – Esquema de uso da técnica da OA por meio de um espelho deformável.

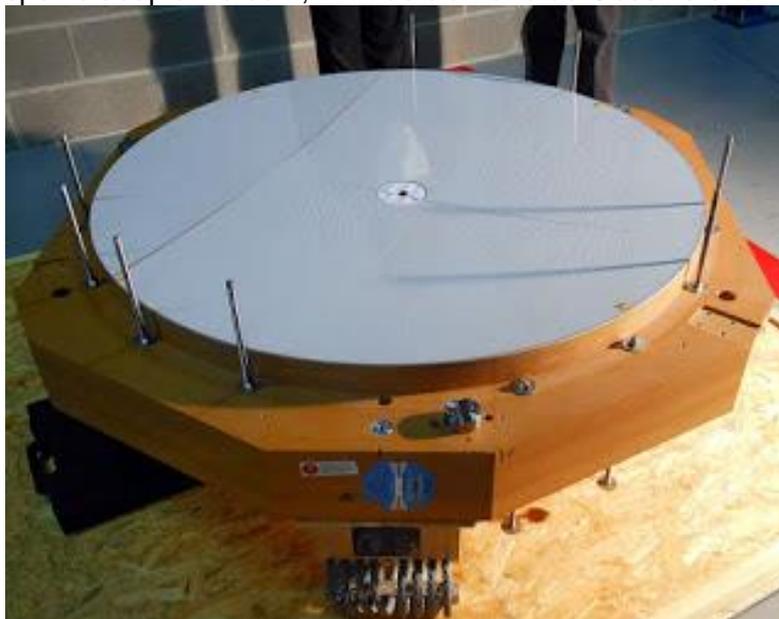


Fonte: Leigui M. 2015¹⁷

¹⁶ Disponível em: <<https://www.telescope-optics.net/induced.htm>>

¹⁷ Disponível em: <<http://leigui.blogspot.com/2015/08/em-breve.html>>

Figura 25 - Espelho adaptativo de 1,12 m de diâmetro do Observatório Europeu do Sul

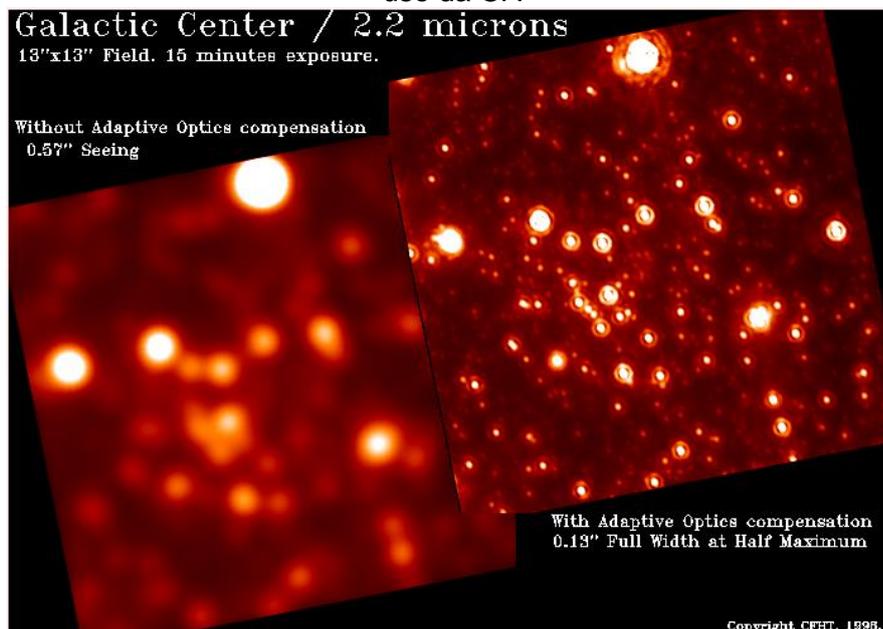


Fonte: ESO¹⁸ (2014)

A prática da Óptica Adaptativa hoje se tornou fundamental para todos os grandes telescópios em solo do mundo, estando presentes no design dos principais observatórios astronômicos e com resultados extremamente eficazes na melhoria da qualidade de imagem. A Fig. 26 apresenta um resultado do uso da OA do sistema Bonnette da Universidade do Hawaii no Telescópio Canada-France-Hawaii em Mauna Kea (Rodrigues I.,1999) e em seguida, a Fig. 27 apresenta uma imagem obtida pelo telescópio Gemini (em solo) com o uso de OA.

¹⁸ Disponível em: <<https://www.eso.org/public/brazil/images/ann14010a/>>

Figura 26 - Imagem do bojo da Galáxia, na esquerda sem o uso da OA e na direita, com o uso da OA



Fonte: CFHT, 1996

Figura 27 – Imagem de HP 1 obtida utilizando o telescópio Gemini Sul no Chile com o uso de OA.



Fonte: Observatório Gemini / AURA / NSF; Libralato M., Space Telescope Science Institute.

Efetivamente como citado anteriormente, esse problema é atenuado quanto menor for a influência da atmosfera. Fator motivador para o investimento e construção de telescópios espaciais, como o caso do Hubble Space Telescope (HST).

Vale ressaltar ainda que, os problemas atmosféricos que influenciam no poder de resolução, caso sejam completamente contornados, não conseguem oferecer imagens sem limite de resolução, as quais tornariam possíveis resolver quaisquer objetos do universo, a quaisquer distâncias.

Há ainda um outro fator limitante, o limite de Rayleigh ou critério de Rayleigh, este que por sua vez influencia e limita a resolução dos objetos, de uma forma “incontornável”. Uma vez que por maior que seja a tecnologia utilizada no processo, este critério ainda ser um limitante, por se tratar de um parâmetro intrínseco ao processo de observação e a propagação ondulatória da luz e do processo da visão.

3.2 - PODER DE RESOLUÇÃO E CRITÉRIO DE RAYLEIGH

Nossa percepção do mundo é fundamentalmente baseada em nossos sentidos, não obstante somos traídos por eles, pelo simples motivo de termos um limite de percepção em cada um dos sentidos. Uma situação simples do cotidiano pode nos dar um claro exemplo disto, como por exemplo, a observação de um veículo à distância numa autoestrada pouco iluminada. Ao enxergarmos um único ponto luminoso, oriundo de um veículo, afirmaríamos categoricamente que se trata de uma motocicleta. Entretanto, já faz parte do “senso comum” e da experiência empírica da população que a validade desta afirmação depende da nossa distância ao veículo.

Tal situação é tão abrangente, que influencia situações que vão desde a visualização de bactérias em um microscópio, testes de acuidade visual, ou até a observação de estrelas binárias visuais com um telescópio. A exemplo de Alfa Centauro, que quando vista a olho nu, se apresenta visível como um único objeto, ao passo que ao observá-la utilizando um telescópio de pequeno porte ou binóculo com abertura de pelo menos 5cm, é observada como um sistema duplo, ver Fig. 28.

Figura 28 - α Cen e sua mais próxima companheira. Observada como uma única estrela a olho nu, e como um sistema binário num telescópio de pelo menos 5cm.



Fonte: NASA – Chandra Images (2018)¹⁹

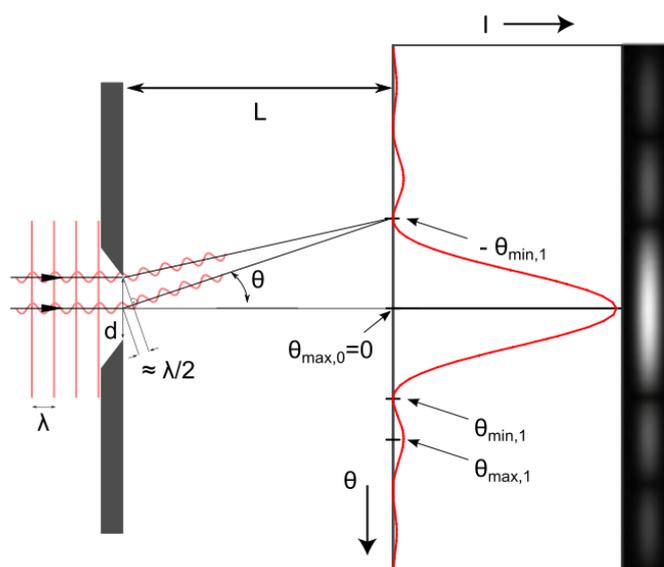
Já estamos acostumados a lidar corriqueiramente com situações como essa, de modo que já faz parte do senso comum, o conhecimento de que não poderíamos ter concluído que se tratava de uma motocicleta ou de um carro, estando a uma distância considerável do veículo. Contudo, o entendimento deste problema está para além do senso comum, e é fonte de estudo da ciência e de trabalhos de pesquisa no ramo da óptica. Fisicamente, a interpretação que explica a causa de situações como essa é o fenômeno da difração, que ocorre em qualquer sistema óptico, incluindo o

¹⁹ Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/images/alpha-centauri-a-triple-star-system-about-4-light-years-from-earth.html>

olho humano, um acontecimento característico de fenômenos com natureza ondulatória, como a propagação da luz.

Como citado em capítulos anteriores, ao sofrer difração as ondas podem ainda interferir entre si, e ao atingirem um anteparo, produzem um padrão de interferência a partir da interferência construtiva e destrutiva das ondas, como esquematizado na Fig. 29.

Figura 29 - Difração da luz por uma fenda de largura d vista em um anteparo a uma distância L . Tendo representado as posições dos máximos e mínimos de interferência.



Fonte: Wikimedia Commons (2012)²⁰

O ângulo θ é definido pela separação angular entre o primeiro mínimo de difração e o máximo central, o comprimento de onda da luz incidente λ e o diâmetro do orifício d . E pode ser obtido por meio da Equação 1 (EISBERG & RESNICK, 1983).

$$\text{sen}\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

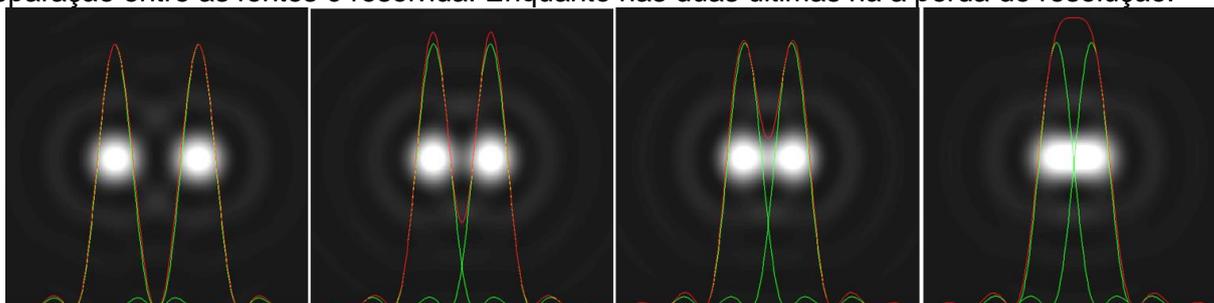
Esse evento e relação estão diretamente ligados ao critério que limita nossa capacidade de distinguir dois ou mais objetos distantes de apenas um. E foi a partir dessa formulação que em 1879, J. W. Strutt III, Lord Rayleigh, propôs que o fator limitante da resolução de um instrumento óptico, em função da separação angular das fontes, seria a posição na qual o primeiro mínimo de difração da luz de um objeto coincidia com o máximo central do padrão de difração do outro objeto.

²⁰ Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Single_Slit_Diffraction_First_Minimum.svg>

Quando essa separação fosse alcançada, a imagem dos objetos estaria no limite de resolução, na qual perdemos a capacidade de resolver individualmente as fontes, definindo assim o Critério de Resolução de Rayleigh (MÜLLER et. al, 1998). Para ilustrar este fenômeno, a Fig. 30. mostra a perda de resolução entre dois objetos, sobreposta aos padrões de difração quando reduzimos a separação angular.

Figura 30 - Ilustração da perda de resolução quando reduzida a separação angular das fontes, sobreposta aos padrões de difração. Na primeira e segunda imagem da sequência a separação entre as fontes é resolvida. Enquanto nas duas últimas há a perda de resolução.



Fonte: *Applet Optical Resolution Model* (Hwang, 2008) ²¹

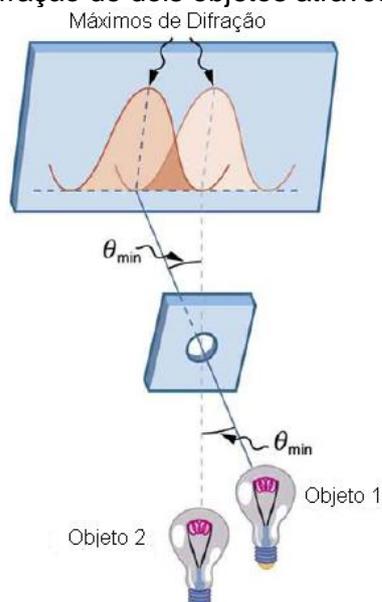
O poder de resolução é um critério arbitrário, definido por meio do Critério de Rayleigh, determinado por meio de uma relação empírica de proporcionalidade entre o comprimento de onda da luz incidente λ e o diâmetro do orifício d por onde entra a luz, por meio da Eq. 1 (Wolfgang & Costas, 2002). A qual, para ângulos muito pequenos, o $\sin\theta$ tende ao valor de θ , e podemos reescrevê-la como:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

A relação expressa acima na Equação 2 é chamada de “Critério de Rayleigh”, e define um parâmetro que limita a capacidade de distinguir objetos individualmente, sem que a luz de suas imagens apareça “misturada”. Definindo essa capacidade como o poder de resolução de qualquer dispositivo óptico, capacidade de distinguir então tais objetos podem ser chamada da capacidade de resolver individualmente os objetos. Uma outra ilustração do fenômeno com os padrões de difração aparece esquematizado na Fig. 31.

²¹ Disponível em: < <https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=8198> >

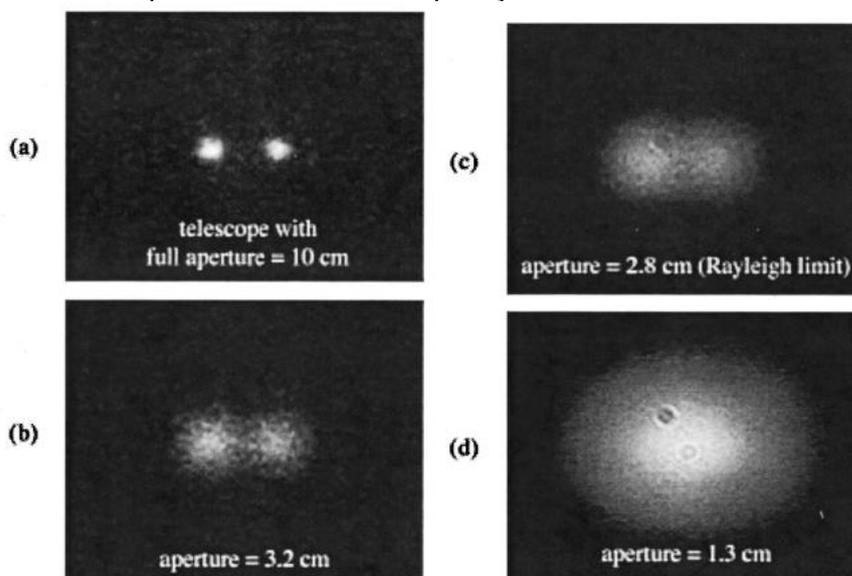
Figura 31 - Esquema experimental do fenômeno da difração e gráfico da intensidade dos máximos de difração de dois objetos através de um orifício.



Adaptado de: Limits of Resolution: The Rayleigh Criterion – OpenStax (2013)

Ilustrando ainda o fenômeno, mas desta vez utilizando telescópios, um bom registro que relaciona o poder de resolução de um aparelho em função do diâmetro da abertura, como descrito pela equação 2, é o resultado apresentado pelo trabalho de Wolfgang & Costas (2012), Ver Fig. 32. Onde os autores observam duas fontes pontuais em solo variando a abertura do telescópio, deixando evidente a perda de resolução entre os objetos.

Figura 32 - Quatro imagens registradas a mesma distância de dois pontos luminosos em solo. Variando apenas a obstrução do tubo do telescópio. Iniciando com os objetos perfeitamente visíveis (a), passando pelo limite de Rayleigh (c), e chegando ao ponto onde não é possível resolver a separação entre as fontes.



Fonte: WOLFGANG & COSTAS (2012)

Esta equação nos permite justificar o esforço em construirmos telescópios cada vez maiores. Uma vez que para um maior valor possível de d temos um valor de θ cada vez menor, permitindo-nos resolver objetos com uma separação angular cada vez menor.

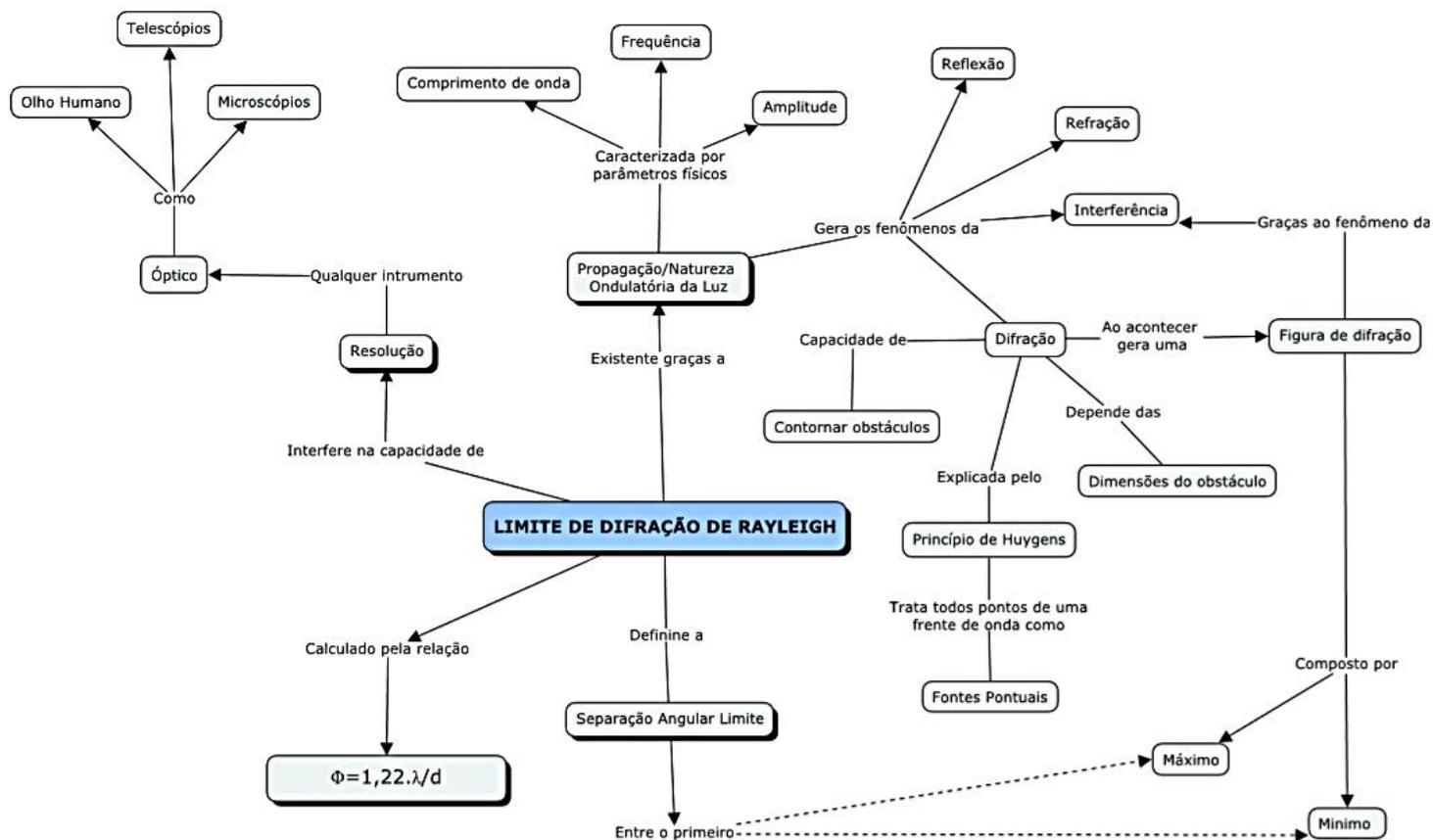
Mas como poderíamos relacionar o poder de resolução angular com a distância em que estamos de um objeto? Considerando a separação entre as fontes como x , e a distância do observador aos objetos como R é possível geometricamente reescrever, para grandes distâncias, o menor ângulo de separação descrito na Eq. 2 na forma (UROME & HINRICHS, 2012 p.1084).

$$\theta = \frac{x}{R} \quad (3)$$

Desta forma, a Eq. 3. nos permite relacionar, de maneira quantitativa, a distância do observador e a separação das fontes com o ângulo mínimo no qual é possível resolver os objetos. Por fim, deve-se ainda atentar, que o critério de Rayleigh não se trata de uma lei, tendo em vista, que ele é obtido a partir de uma definição arbitrária na escolha dos pontos nos padrões de difração (SHANNON & WYANT, 1983 p.126).

Tendo em vista o presente exposto nessa seção e os fenômenos ondulatórios na anterior, podemos apresentar um mapa conceitual, relacionando os conceitos do critério de Rayleigh no cenário do estudo da Óptica na educação básica (Ver Fig.33).

Figura 33 – Mapa conceitual construído para localização do limite de difração de Rayleigh no contexto da Óptica física na educação básica. Construído utilizando o software Cmap Tolls.



3.2.1 KIT-DIDÁTICO PARA ESTUDO DO CRITÉRIO DE RAYLEIGH COMO CONTEXTUALIZAÇÃO DO FENÔMENO DA DIFRAÇÃO

Dentro do cenário descrito anteriormente, temos ciência de que o estudo e discussão da difração e do critério Rayleigh é de fundamental importância para o ensino de Ciências, principalmente por interferir diretamente em situações que vão desde a capacidade de resolução de microrganismos em um microscópio até a observação de corpos celestes.

Tudo isso, definiria a apresentação desse conteúdo como uma prática de grande importância, pois como citamos, se trata de um conceito fundamental para a compreensão do mundo que nos cerca, contudo, mesmo sendo tão recorrente no dia a dia dos estudantes, a difração não é encontrada em grande parte das ementas prioritariamente trabalhadas na educação básica. Deixando a sua compreensão a

cargo do “senso comum”, se fazendo presente prioritariamente em ementas de cursos superiores da área de exatas, nas disciplinas de Óptica.

Em parte, essa ausência na educação básica pode ser compreendida ao estabelecer uma correlação entre a formação do profissional e a familiaridade com os conteúdos ministrados. Uma vez que, estudos como o realizado pelo INEP (2007), revelavam que apenas 25,0% dos profissionais atuantes na área de física tinham formação específica, o que representa apenas 2,8% do total de professores da rede. Um dado que pode estar em concordância com a análise feita por Galli & Salami (1999) sobre a ausência desses conteúdos em sala graças às dificuldades teóricas que envolvem o assunto. O que ainda interfere diretamente na inserção da Física Moderna no currículo, visto que, a discussão e compreensão do fenômeno da difração é essencial para introduzir uma apresentação da natureza dual da propagação da luz em experimentos históricos.

Esse cenário, configura a apresentação do problema da resolução contextualizado à astronomia uma abordagem promissora do ponto de vista didático, uma vez que o uso da Astronomia como agente motivador para o ensino de ciências já tem apresentado e avaliado em diversos trabalhos resultados promissores.

Entretanto quando olhamos de forma mais específica, buscando sobre propostas experimentais diádicas para o estudo do Critério de Rayleigh, podemos encontrar uma série de estudos, como o de Muller et al. (1998), trazendo um tratamento experimental do Critério de Rayleigh por meio do uso de um laser de He-Ne e a análise os padrões de difração gerados pelos orifícios; Ou Meilan & Garavaglia (1997) analisando o critério na difração de luz de fontes com composições espectrais diferentes; Ou ainda análises do critério Rayleigh na resolução de dois pontos utilizando filtros parabólicos, por Thirupathi & Ramakrishna (2014). Além de diversos outros que constam nas referências deste trabalho.

Contudo, embora seja possível encontrar uma quantidade considerável de trabalhos sobre essa temática, a quantidade de experimentos didáticos voltados ao ensino básico é extremamente escassa senão nula. Deixando passar quase que despercebidas aplicações simples e extremamente contextualizadas como o problema do poder de resolução, como o teste de acuidade visual chamado de tabela ou optótipo de Snellen (Ver. Fig. 34).

Figura 34 - Tabela ou Optótipo de Snellen, diagrama utilizado para

20/200	E	1
20/100	F P	2
20/70	T O Z	3
20/50	L P E D	4
20/40	P E C F D	5
20/30	E D F C Z P	6
20/25	F E L O P Z D	7
20/20	D E F P O T E C F	8
20/15	L E F O D P C T P	9

Fonte: ISEE - International Society for the Enhancement of Eyesight (2019). Adaptado²²

Sob esse cenário, vislumbramos a oportunidade de utilizar o problema do critério de Rayleigh para introduzir ao aluno do ensino médio o fenômeno da difração. Nesse sentido, este trabalho se propõe a explorar o conteúdo da difração, por meio de uma abordagem específica: a do limite de resolução de Rayleigh.

Por meio da construção e da aplicação em sala de aula de um kit didático centrado em um experimento simples que busca conceituar e calcular o limite de resolução dos estudantes. Buscando contribuir por meio desse material para a compreensão do fenômeno da perda da capacidade de resolução, difração e fenômenos correlatos. Promovendo a superação do “senso comum” e levando-os a compreensão das verdadeiras causas desse evento.

²² Disponível em: http://www.i-see.org/block_letter_eye_chart.pdf>

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO DA PROPOSTA

Neste capítulo, descrevo toda a trajetória do trabalho, desde a avaliação preliminar do problema de pesquisa até a aplicação da proposta de metodológica em sala de aula. Para tal, apresento a sequência de ações e conceitos prévios que foram trabalhados antes da aplicação da atividade experimental proposta.

Vale destacar também, que visando contribuir para a avaliação do material elaborado, por meio de um teste de hipóteses, a metodologia foi aplicada de dois modos diferentes. Separando as turmas em turmas de controle, e turmas de aplicação. Com a turmas de controle, foi feita a apresentação regular dos conteúdos, sem o uso da contextualização com o poder de resolução e da atividade experimental. Com as turmas de aplicação toda proposta foi realizada. Na qual, após apresentação de alguns fenômenos ondulatórios, é apresentada a de maneira contextualizada o problema do poder de resolução e o critério de Rayleigh.

Objetificando por meio de pré e pós testes aplicados nessas turmas obter resultados quantitativos que pudessem permitir a avaliação da eficácia da proposta em contribuir no processo de ensino-aprendizagem.

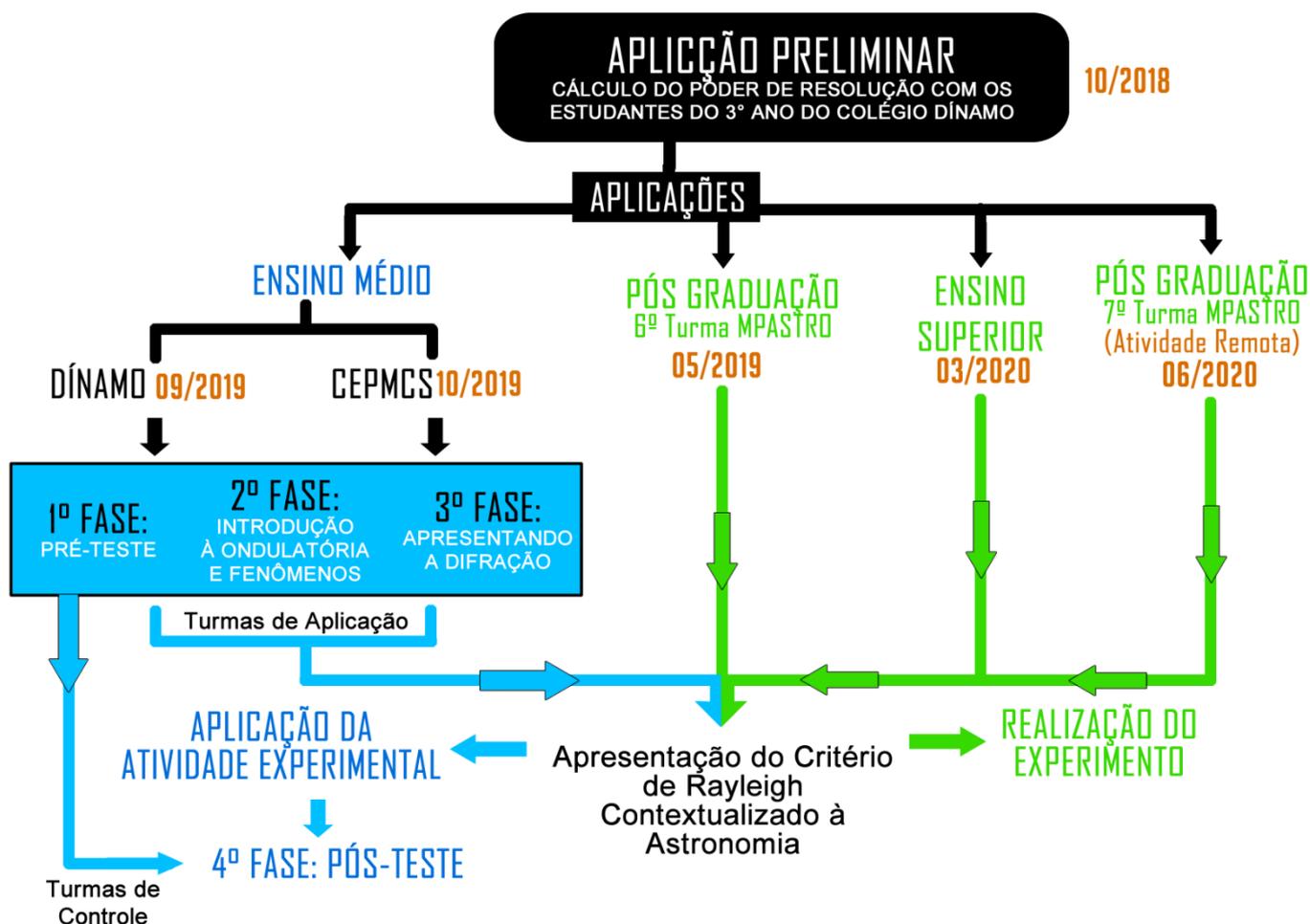
Aplicações paralelas da proposta, também aparecem no fluxograma, nelas exploramos a eficácia da atividade experimental para determinação do critério de Rayleigh, assim como a contribuição da proposta em outros níveis de ensino.

4.1 – Metodologia

Nesta seção irei apresentar quais foram os passos e as atividades realizadas no desenvolvimento do trabalho, para melhor visualização apresento de início um fluxograma que situa todas as atividades desenvolvidas nas etapas da pesquisa. Logo em seguida, apresento o meu público alvo assim como os locais de aplicação. Trago logo depois os questionários utilizados como pré e pós testes, e descrevo todas as etapas do trabalho com os estudantes aula por aula até o momento de culminância com a realização do experimento e por fim aplicação dos pós teste.

Todas as etapas e ambientes de aplicação da metodologia que serão descritas a seguir, estão contempladas no fluxograma da Fig.35. Subdividida em grupos que se dividem em educação básica, ensino superior e pós-graduação. Este último com professores mestrandos do programa de pós-graduação MPASTRO (UEFS) das 6ª e 7ª turma.

Figura 35 – Fluxograma das etapas da pesquisa. A esquerda (em azul) as etapas referentes ao ensino médio. Utilizando a proposta experimental e avaliada com pré e pós testes. A direita (em verde) as etapas da aplicação do ensino superior e pós graduação.



4.1.1 - Público Alvo e Locais de Aplicação

O desenvolvimento deste trabalho envolveu um público de diversos níveis de ensino, dentre eles, duas turmas do Mestrado Profissional de Ensino de Astronomia da UEFS – MPASTRO (Feira de Santana – BA), duas turmas de 2º ano de Ensino Médio no Colégio Dínamo (Alagoinhas – BA), 3 turmas de Ensino Médio no Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana – CEPMCS (Aramari – BA) e 1 turma de Graduação em Física da UEFS em colaboração com o professor da disciplina de Física IV no semestre de 2020.1 (Prof. Dr. Germano P. Guedes). Totalizando um público de 141 estudantes envolvidos no trabalho de pesquisa, e abrangendo os 3 níveis de ensino, básico, superior e pós-graduação;

Cabe ainda um destaque ao grupo de professores mestrandos da 7ª turma do MPASTRO. No período da realização com a o grupo em questão, vivíamos um momento de isolamento social por conta da pandemia de COVID-19. Por este motivo,

a aplicação foi feita de modo remoto, na qual foi feita uma breve apresentação de 30min via chamada de vídeo sobre o poder de resolução, tendo encaminhado em seguida para eles a proposta de atividade experimental. A qual eles desenvolveram em suas casas, com os recursos que dispunham e deram retorno por meio de um formulário online.

Além dos resultados quantitativos, também foi solicitado para este grupo um parecer, explorando as suas perspectivas como professores, acerca da viabilidade de aplicação, pontos positivos e negativos da proposta. Tais pareceres são trazidos na íntegra na secção de apêndice deste trabalho, além de serem utilizados na análise de resultados.

Quanto à abordagem no ensino médio, vale reafirmar que a realização dos pré e pós-testes, como apresentado no fluxograma da Fig. 35, foi feita apenas para o público do ensino médio. Os demais públicos participaram apenas da apresentação teórica sobre o critério de Rayleigh e da aplicação do roteiro experimental, exceto as turmas de 2º Ano B (Colégio Dínamo) e 2º Ano A Vespertino (CEPMCS) que foram utilizadas como turma de controle. Os locais onde foram realizadas as aplicações, assim como o número de estudantes envolvidos na realização do experimento são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Contagem dos estudantes envolvidos por turma e local de ensino

LOCAL	Número de Estudantes Envolvidos
6ª Turma MPASTRO - UEFS (Mestrado Profissional de Ensino de Astronomia)	18
Colégio Dínamo - 2º Ano A	20
Colégio Dínamo - 2º Ano B (Turma de Controle)	19
CEPMCS – 2º Ano AM	21
CEPMCS – 2º Ano BM	18
CEPMCS – 2º Ano AV (Turma de Controle)	22
Turma de Física – Física Experimental IV – UEFS (Universidade Estadual de Feira de Santana)	13
7ª Turma MPASTRO - UEFS (Mestrado Profissional de Ensino de Astronomia)	10
Número de Estudantes Envolvidos na Aplicação da Proposta Experimental	100
Número de Estudantes Envolvidos em Todas Etapas da Proposta	59
Total de Estudantes Envolvidos	141

4.1.2 – Aplicação do Pré-Teste – 1ª FASE

Motivados pela necessidade de elaborar um mecanismo avaliativo para a atividade a ser desenvolvida, foi elaborado um pré-teste com a intenção de sondar os conhecimentos prévios dos alunos numa perspectiva conceitual dos conteúdos da ondulatória. O teste foi aplicado antes de trabalhar com a turma qualquer conteúdo da ondulatória/óptica e elaborado utilizando situações cotidianas envolvendo princípios ondulatórios de fácil correlação e visualização, envolvidos de forma direta ou indireta no fenômeno da difração.

Objetificando também, despertar a curiosidade dos estudantes para alguns fenômenos corriqueiros. Evitando, por esse motivo, que o teste fosse muito extenso, algo que poderia torná-lo cansativo e desinteressante para os alunos. Além disso, as questões elaboradas foram discursivas, e em algumas delas, foi solicitado aos estudantes que representassem com esquemas ou desenhos as suas concepções acerca do fenômeno envolvido, buscando extrair o máximo de informações sobre as concepções de cada aluno.

A tabela 2 apresenta as questões do teste, assim como uma justificativa da(s) motivação(ões) pelas quais cada uma das questões foi inserida no teste.

Tabela 2 – Questões do Pré-Teste aplicado na 1ª Fase, com comentários do autor sob a motivação por trás de cada questão.

Questão	Motivação/Fenômeno Relacionado
<p>1. Considere a seguinte situação:</p> <p>“Dois vizinhos separados por um muro alto desejam conversar, mesmo sem conseguir se ver, eles conseguem ouvir a voz um do outro sem a necessidade de gritar.” Considerando que a luz e som viajam da mesma forma, como uma onda, como você poderia explicar que eles conseguem se ouvir, contudo não se veem?</p>	<p>Essa situação tem a intenção de provocar o aluno a refletir a respeito da questão que mais tarde será respondida quando estudarem sobre a difração. Uma questão da relação da ordem de grandeza do comprimento de onda com a dimensão do obstáculo, no fenômeno da difração.</p>
<p>2. Ao entrar numa caverna, um aventureiro grita, logo na entrada, um intenso: “Olá? Há alguém aí?”. Logo após poucos segundos, ele ouve sua voz repetida em um: “Olá? Há alguém aí?”. Tal fenômeno é conhecido popularmente como Eco. Descreva com duas palavras, utilizando esquemas se necessário, como o eco é formado.</p>	<p>Essa questão tem por objetivo sondar como o aluno compreende uma das aplicações do fenômeno da reflexão no dia a dia.</p>
<p>3. O Brasil está situado em uma posição geográfica de pouca, ou quase nula incidência de eventos sísmicos, como terremotos. Mas imagine a situação em que uma atividade</p>	<p>A situação descrita nesta questão, contextualizada à baía de todos os santos tem a intenção de verificar</p>

incomum no oceano Atlântico gera frentes de onda na direção da Baía de Todos os Santos. Ao ser notificado, o Governo da Bahia decide emitir um alerta para todos os bairros e municípios que irão ser afetados pela ação dessa onda.

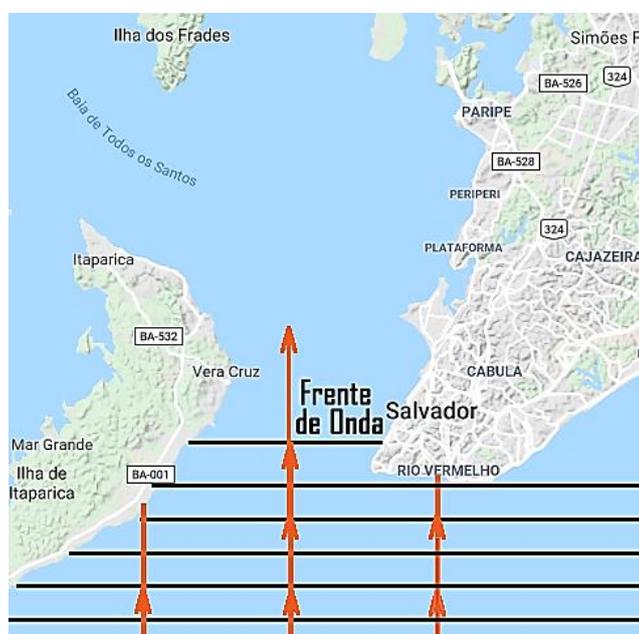


Fig. 1 – Problema das ondas em direção à Baía

Sinalize com um círculo no mapa o nome das regiões que, na sua concepção, serão afetadas pela ação dessa onda.

4. Alguns modelos de fone de ouvido têm uma tecnologia chamada “Cancelamento de Ruído”, essa tecnologia permite que o ouvinte tenha os efeitos de ruídos externo atenuados, por meio de uma onda sonora gerada pelo fone com a intenção de “atenuar” a onda sonora do ruído, gerando uma melhor experiência ao ouvir música em locais barulhentos.

Considerando que a onda do ruído externo tenha a forma da Figura 2, represente sobre os eixos da Figura 2 qual deve ser a forma da onda que anule completamente o ruído.

se os alunos já apresentam um conhecimento prévio, oriundo da experiência empírica no seu dia a dia sobre o que virá a ser estudado mais tarde como o princípio de Huygens.

Onde o resultado esperado, considerando a propagação retilínea das ondas, é que cheguem frentes de ondas apenas nas regiões de Vera Cruz e Rio Vermelho. Mas considerando que as ondas difratem ao entrar pela baía, teremos possivelmente frentes de onda chegando à região de Itaparica, Plataforma, Periperi, entre outras.

Nesta questão, temos a intenção de verificar se os alunos conseguem representar graficamente a superposição de ondas numa situação de interferência destrutiva. Buscando perceber se os alunos apresentam algum conhecimento prévio a respeito do conceito de fase e diferença de fase.

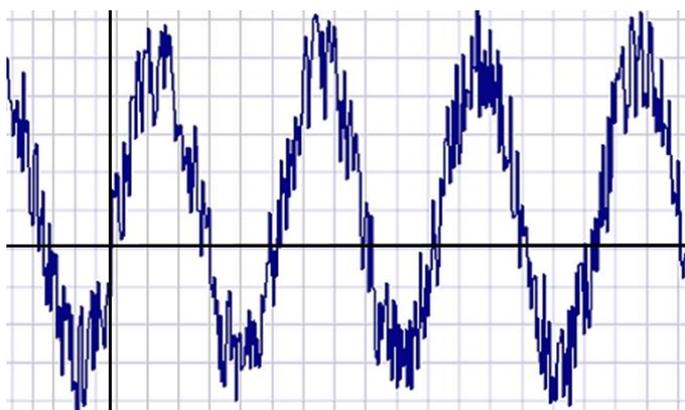


Fig. 2: Gráfico Ilustrativo de uma onda “ruidosa”

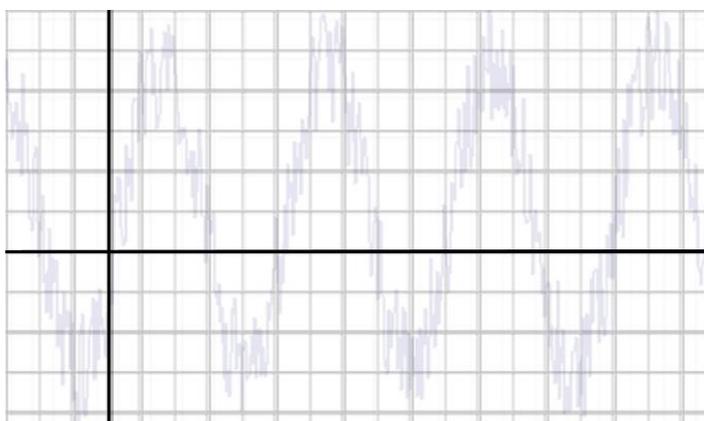


Fig. 3: Eixo para construção do esboço da onda gerada pelo fone

5. Antes de decolar um avião, um dos primeiros avisos da tripulação é um alerta solicitando que os aparelhos de celular sejam desligados. Apesar de desejar o conforto dos passageiros, essa é uma prática de segurança comum em vôs. Tanto que, todos os aparelhos celulares saem de fábrica com uma função chamada “modo avião”. Qual você acredita ser o motivo dessa exigência? Ou como o sinal de celular poderia influenciar no voo?

A situação proposta visa verificar se os alunos conseguem compreender sobre a influência de algumas faixas de ondas eletromagnéticas nas telecomunicações. E a correlação destas com o fenômeno da interferência.

6. Ao introduzir um lápis em perfeito estado num copo de vidro cheio d’água, e observá-lo através do vidro, você percebe que ele aparenta estar quebrado, justamente na linha de separação entre o ar a água. Ao retirá-lo da água você percebe que ele está intacto. A partir da situação, responda o que se pede:

Ao propor esse problema para os alunos, tenho a intenção verificar a compreensão da influência da mudança de meio para uma onda. Ao passar de um meio mais



Fig. 4: Foto de um lápis dentro de um copo d'água

Você já vivenciou esse fenômeno? Na sua compreensão qual a sua causa e porque ele acontece?

refringente para o menos ou vice versa.

4.1.3 – Introdução e Fenômenos Ondulatórios – 2ª FASE

Nessa fase, desenvolvi numa sequência de encontros abordando os conteúdos necessários para a compreensão dos fenômenos ondulatórios antes de tratarmos sobre a difração. Nela desejava desenvolver os tópicos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Sequências de aulas realizadas na aplicação do trabalho no Ensino Médio

Aula	Tema	Duração Média
1	Conceito e Elementos de uma Onda: Equação Fundamental	2 Aulas (100min)
2	Classificação Quanto a forma de Propagação e Natureza das Ondas: Transversais/Longitudinais e Mecânicas/Eletromagnéticas	2 Aulas (100min)
3	Fenômenos Ondulatórios: Reflexão de Ondas – Leis da Reflexão	2 Aulas (100min)
4	Fenômenos Ondulatórios: Refração de Ondas – Lei de Snell	2 Aulas (100min)
5	Fenômenos Ondulatórios: Interferência – Interferência em Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas	2 Aulas (100min)

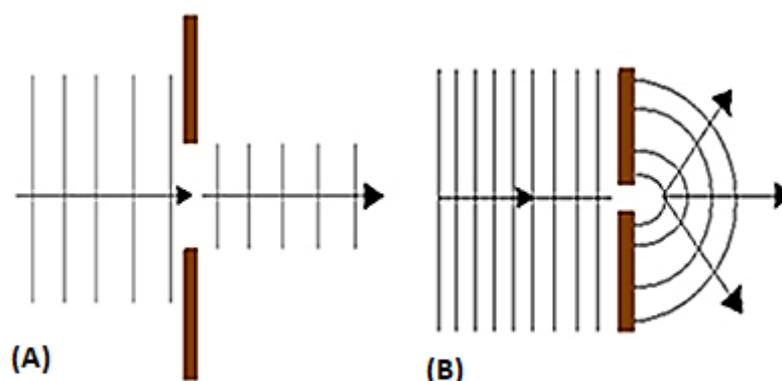
Não é intenção do trabalho delimitar a forma de apresentação dos conteúdos para além da difração, mas algumas práticas exitosas valem ser destacadas na apresentação das etapas deste trabalho, e são trazidas ao final do trabalho no apêndice (Ver Apêndice 1).

4.1.4 – Apresentando o Fenômeno da Difração – 3ª FASE

Nessa fase, foi apresentado aos alunos uma discussão sobre os resultados esperados pelo senso comum em contraponto com o que é observado na propagação de ondas ao passarem por um obstáculo ou fenda. Assim como apresentado na introdução teórica do tema no capítulo anterior.

Esquemáticamente, a situação pode ser apresentada como ondas planas de comprimento de onda λ seguindo na direção de um anteparo com uma única fenda (Ver Fig. 36). Juntamente com os alunos, foi feita uma análise de qual é o resultado esperado para o fenômeno (Ver Fig. 36A), em discutido em comparação com o resultado experimental (Ver Fig. 36 B).

Figura 36 - Concepções de uma onda plana ao passar por uma fenda. Em (A) o resultado previsto, em (B) o resultado experimental. Descrito por Huygens.



Como ilustração para a situação, pode ser trazida a análise do comportamento das ondas vindas do mar ao adentarem uma baía, que caso se contemplassem o resultado esperado, deveríamos observá-las apenas em uma região da praia. Resultado que não é observado experimentalmente, assim como a luz ao entrar num quarto escuro pelo buraco da fechadura, formando na parede uma figura de dimensões bem maiores que a fechadura.

Neste momento oportuno com os estudantes, foi elucidado o Princípio de Huygens sobre a propagação das frentes de uma onda. Correlacionando o fato observado, com a análise de que cada ponto de uma frente de onda se comportando como uma nova fonte de ondas com as mesmas características. O que dá ao observador uma sensação de que a onda tem a capacidade de contornar um obstáculo em seu caminho. Uma vez que ao encontrar um obstáculo, é capaz de preencher regiões onde graças à reflexão das ondas que chegaram ao obstáculo não seriam capazes de alcançar.

Por fim estabelecemos a correlação entre o comprimento de onda e a dimensão do obstáculo, com a difração da onda. Para isso, utilizaremos duas situações-problema para promover o debate em sala. Uma delas diz respeito a difração em ondas eletromagnéticas em comparação às ondas mecânicas. A outra, diz respeito a difração em ondas de rádio nas frequências AM e FM.

Situação 1 (Onda Mecânica/Eletromagnética): *“Como alguém atrás de um muro conseguiria ouvir a voz de outra pessoa do outro lado, embora não consiga vê-la. Uma vez que tanto a Luz refletida pela pessoa, quanto o som emitido por ela se comportam como onda?”*

Situação problema, proposta com a intenção de promover o debate, tendo o professor como agente mediador, para que os alunos, utilizando dos conhecimentos adquiridos nas fases anteriores, estabeleçam uma comparação dos comprimentos de onda da luz e do som em comparação à barreira em que a onda incide nesta situação. Para tal, se faz necessário que o professor forneça valores médios do comprimento de onda da luz e do som durante a mediação.

Situação 2 (Difração em Ondas Eletromagnéticas AM/FM): *“Em uma região da cidade com diversos prédios, um motorista percebe que ao passar por trás de alguns prédios, perde a sintonia com as rádios FM (Ex: 100Mhz). E ao buscar novas rádio na faixa AM (Ex: 600Khz), constata que as rádios dessa modalidade de transmissão não são afetadas ao passar por trás dos prédios.”*

A segunda situação proposta teve o objetivo de correlacionar novamente, a influência do comprimento de onda no fenômeno da difração. Mediando novamente a interação com a intenção de provocar os alunos a estabelecerem uma relação entre o comprimento de onda das ondas FM (3m, na frequência de 100Mhz), com o comprimento de onda das ondas AM (500m, na frequência de 600Khz). Relacionando novamente o fenômeno da difração, com as dimensões do obstáculo em comparação com o comprimento da onda.

4.1.4 – Difração e o Critério de Rayleigh – 4ª FASE

a) Abordagem Conceitual em Sala

Para dar início a esta fase, fizemos a problematização com o uso de um instrumento bem simples, e que com certeza já esteve presente na vida dos estudantes em algum momento. Este problema diz respeito a “*Tabela de Snellen*” (Ver Fig.37) teste muito utilizado para averiguação da acuidade visual em consultórios de optometria. A problematização segue uma metodologia similar à do exame, na qual foi solicitado que os alunos identificassem na tabela, linha por linha, qual caractere estava escrito.

É de se esperar que em alguns momentos, os alunos perca a capacidade de resolver a separação entre dois pontos da letra “C”, confundindo-a com a letra “O”, ou ainda um “F” com a letra “P”, tudo por conta da dificuldade em resolver a separação entre os pontos de uma letra na tabela. Dificuldade que como vimos, está associada ao poder de resolução de cada pessoa. É claro, que problemas visuais de ordem morfológica, como as ametropias podem afetar este resultado para além apenas do critério de Rayleigh, contudo estes defeitos da visão são minimizados para efeitos de contagem quando trabalhamos com a média com grupos maiores, ou os estudantes já utilizam óculos.

Figura 37 - Tabela de Snellen. Utilizada em teste de acuidade visual.

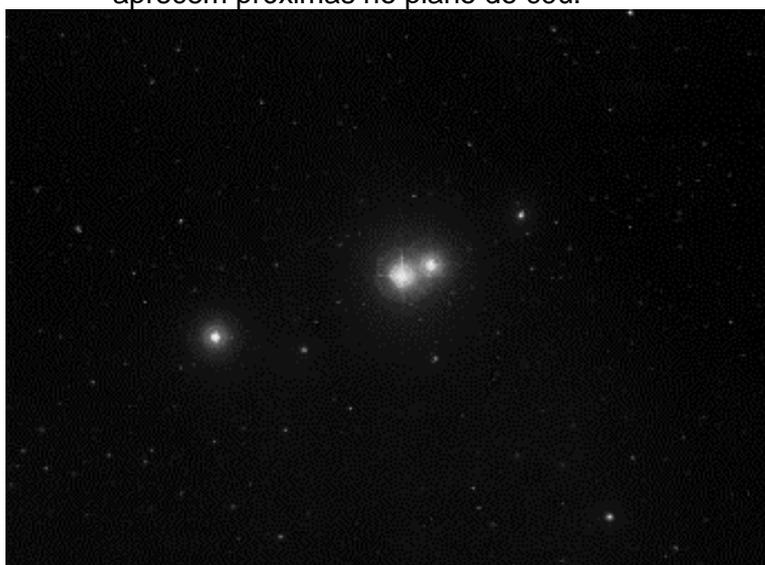
20/200	E	1
20/100	F P	2
20/70	T O Z	3
20/50	L P E D	4
20/40	P E C F D	5
20/30	E D F C Z P	6
20/25	F E L O P Z D	7
20/20	D E F P O T E C F	8
20/15	L E F O D P C T P	9

Adaptado de: ISEE - International Society for the Enhancement of Eyesight (2019).²³

²³ Disponível em: http://www.i-see.org/block_letter_eye_chart.pdf

Após feita essa contextualização, apresentamos a temática para além do consultório oftálmico, no momento em que apresentamos aos estudantes que essa problemática afeta não só nossa visão, mas também instrumentos óticos como microscópios, câmeras fotográficas e telescópios. Como por exemplo, a percepção de um par de Estrelas Binárias Visuais como uma única estrela, como o caso de *Alpha Capricorni* (Ver Fig.38).

Figura 38 - *Alpha Capricorni*, sistema de estrelas binárias. Nas quais as componentes aparecem próximas no plano do céu.



Fonte: Aladin²⁴

Para além deste simples exemplo, a discussão foi estendida utilizando imagens de objetos astronômicos, e apresentando os instrumentos que eram necessários para a aquisição de tais imagens. Comparando também, imagens do mesmo objeto, feitas com telescópios pequenos, de baixa resolução, e grandes telescópios, de alta resolução.

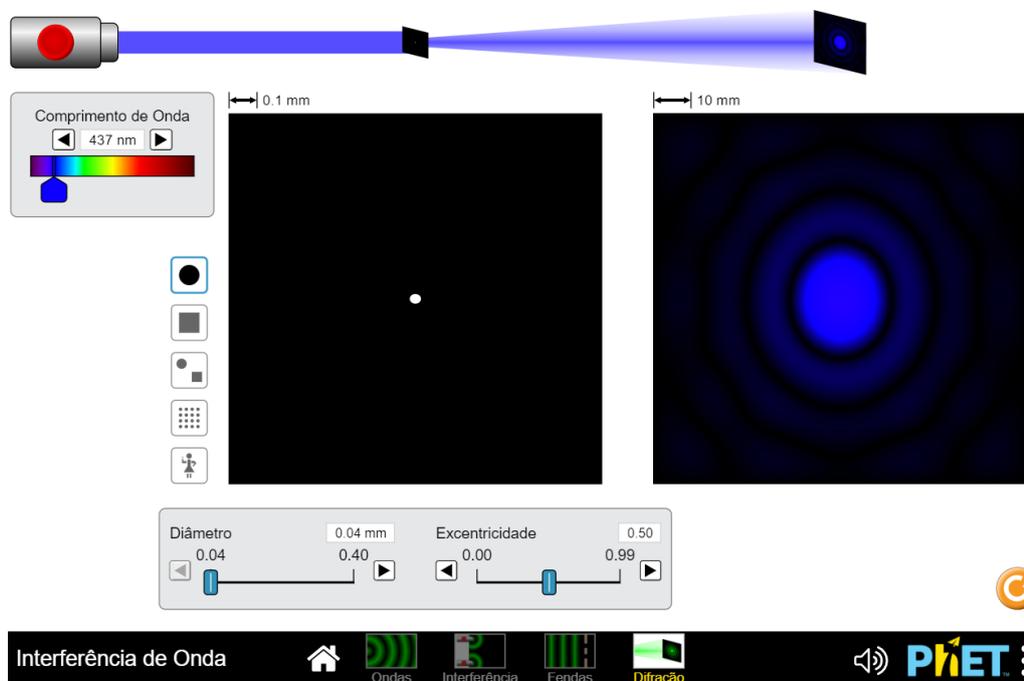
Após essa contextualização, retomamos a discussão ao redor da difração, e apresentamos aos estudantes uma figura de difração gerada por uma onda – especificamente eletromagnética e coerente – ao passar por uma fenda circular, incidindo sob um anteparo. Fazendo neste momento correlação entre o Princípio de Huygens e o fenômeno da Interferência para explicar a presença dos máximos e mínimos de intensidade na figura de difração. Ilustrando o fenômeno com a utilização de outro *applet* do PhET²⁵ capaz de simular o padrão de interferência gerado pela luz

²⁴ Disponível em: <<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=Alpha+Capricorni>>

²⁵ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_pt_BR.html>

ao passar por uma fenda circular. Sendo permitido no *applet*, ajustar o diâmetro da fenda, excentricidade e comprimento de onda da luz (Ver Fig.39).

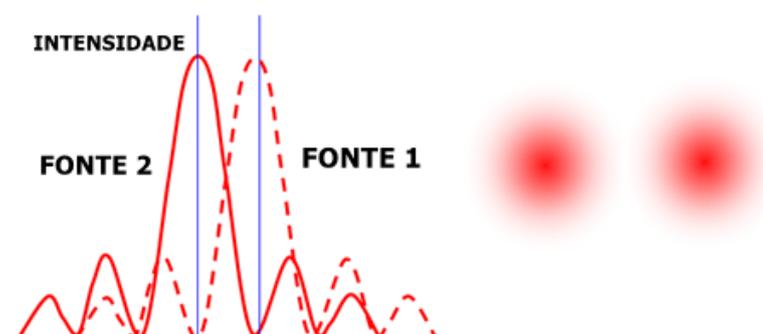
Figura 39 – Simulação do PhET para ilustrar o fenômeno da difração e interferência da luz ao passar por uma fenda circular.



Fonte: PhET *Interactive Simulations*¹⁸

Após toda a abordagem teórica, apresentados aos estudantes à aquele que vem a ser o fator limitante da nossa capacidade de resolução, o critério de Rayleigh. Numa sucinta abordagem, citando que, se uma fonte ao passar por uma fenda, gera um padrão de difração/interferência, ao observarmos a luz de duas fontes passar por uma fenda é de se esperar que tenhamos dois padrões de difração sobrepostos, como ilustra a Fig. 40.

Figura 40 – Padrões de difração/interferência de duas fontes ao passar por uma fenda, e ao lado, ilustração da imagem das fontes, bem resolvidas.



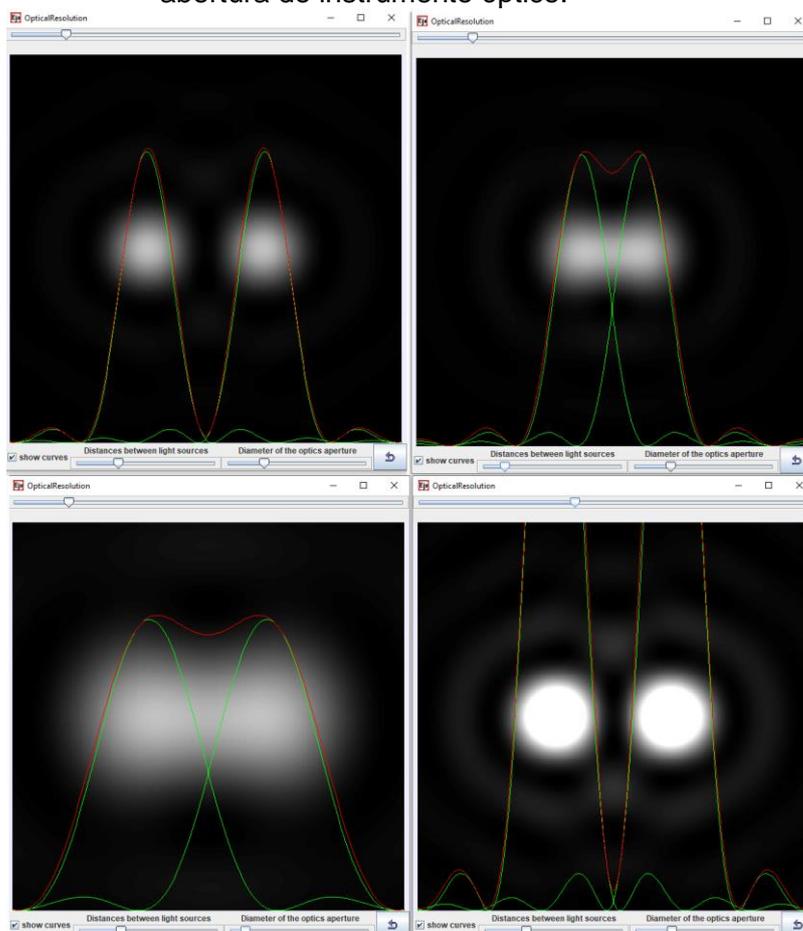
Fonte: IOP, Institute of Physics²⁶

²⁶ Disponível em: <<https://spark.iop.org/episode-323-diffraction#gref>>

É possível debater com os estudantes neste momento que é de se esperar, ao aproximar as fontes, reduzindo a separação angular entre elas, que os máximos de difração se tornem cada vez mais próximos, tornando-se “misturados” a um limite onde não seja mais possível resolver individualmente as fontes (limite de Rayleigh). O mesmo acontece caso aumentemos a nossa distância às fontes, reduzindo também a separação angular.

Apresentamos brevemente equação 2 do critério de Rayleigh, dando o devido tratamento, tendo em vista o nível de ensino em que estamos trabalhando (nível médio). Utilizei para tal, como forma de simplificação, um outro *Applet* que aparece na figura 41 para apresentar de maneira muito ilustrativa a relação das variáveis envolvidas na capacidade de resolução de um instrumento ótico, verificando a posição dos máximos e mínimos de interferência da figura de difração como o fator determinante para a perda de resolução.

Figura 41 - Interface do *Applet* em diversas configurações entre as fontes e em níveis de resolução diferentes. Que podem ser obtidos ao variar a separação entre as fontes, ou a abertura do instrumento ótico.



Fonte: Optical Resolution Model, HWANG F. (2008) ²⁷

²⁷ Disponível em: < <https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=8198>

Desenvolvido por Hwang (2008), o *applet* ilustra perfeitamente a perda de resolução entre dois objetos luminosos, no momento em que o máximo de difração de uma das fontes encontra geometricamente a posição do primeiro mínimo de difração da segunda. Ao *applet* nos permitindo ainda ajustar a intensidade das fontes, a distância entre elas e o diâmetro da abertura do dispositivo pelo qual estamos observando-as. Ilustrando de uma maneira incrivelmente didática as diferentes configurações dos máximos e mínimos de difração, e sua influência no poder de resolução.

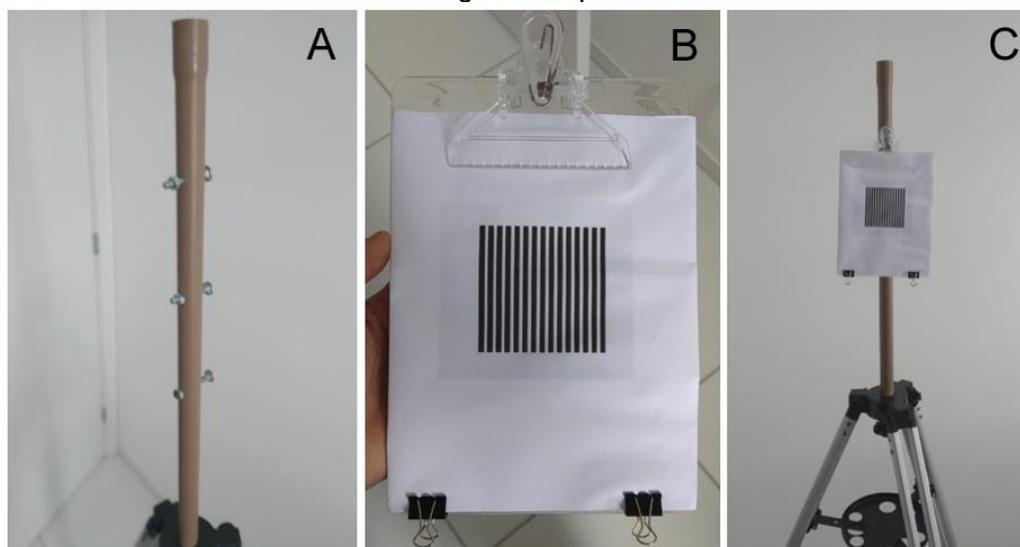
b) O Experimento

Compreendendo toda abordagem teórica envolvida no processo de perda de resolução, os estudantes foram convidados a participar de um experimento onde puderam vivenciar a perda da capacidade de resolução em uma situação prática. E conheceram qual a distância máxima cuja qual cada um deles conseguia resolver duas linhas separadas por uma distância de cerca de 2mm. A proposta experimental utilizada foi a seguinte.

A realização do experimento aconteceu por meio da aplicação dos seguintes passos:

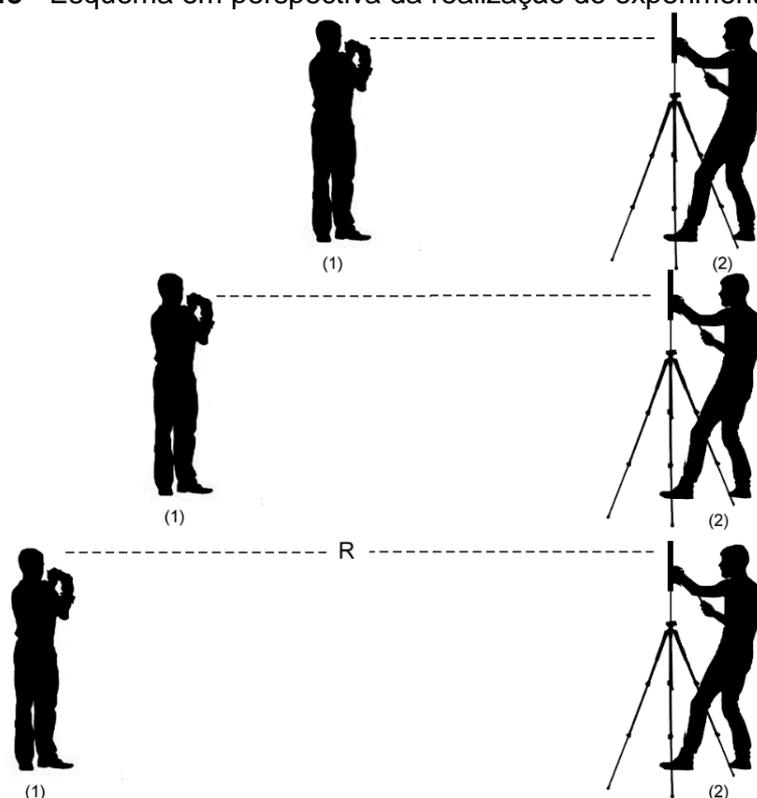
1. O estudante devia segurar a ponta de uma trena na posição $S_0=0$ próximo aos olhos. A trena, por sua vez, era posicionada exatamente sobre a prancheta que contém a folha. (Ver Fig. 42 e 43).

Figura 42 - Arranjo desenvolvido para estudo do critério de Rayleigh por meio da proposta. Em A o suporte para fixação da prancheta, B a prancheta com o padrão utilizado e C a montagem completa.



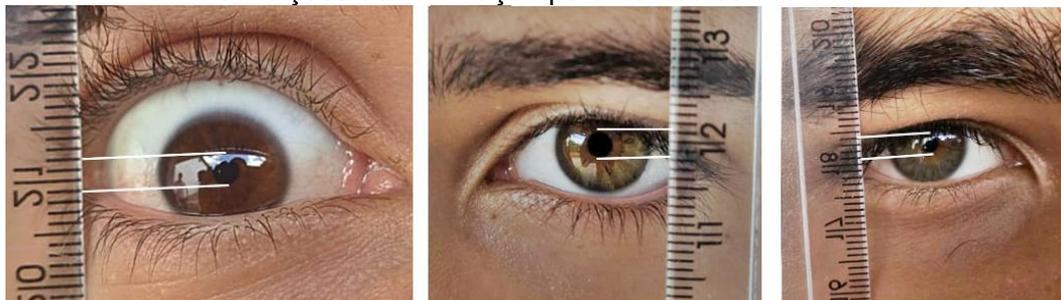
2. Partindo de uma posição inicial em que consegue resolver individualmente as linhas escuras, próximo à folha, o estudante deveria se distanciar gradativamente da montagem. Até que não conseguisse mais perceber a separação clara entre das linhas escuras. Percebendo apenas um quadrado totalmente escuro.
3. Neste momento, mantendo as extremidades da trena fixas, e a trena tracionada, era feita a leitura da distância (R) na qual o estudante perdeu a resolução da separação entre as linhas (Ver Fig. 43).

Figura 43 - Esquema em perspectiva da realização do experimento



4. Os passos anteriores 1,2 e 3, foram repetidos com todos estudantes, utilizados para preencher a Tab. 4, que tem por objetivo determinar a distância média, em que os estudantes desta turma perdem resolução das linhas.
5. Ao final da aplicação – desde que, sob as mesmas condições de iluminação utilizadas durante a aplicação – com a ajuda de uma régua e uma câmera, era feita a estimativa o diâmetro d da pupila do observador (Ver Fig. 44)

Figura 44 - Exemplo de medida de diâmetro de pupila. Realizadas sob as mesmas condições de iluminação para os três estudantes.



Os resultados desta aplicação são utilizados para o preenchimento de uma tabela com o formato da Tabela 4.

Tabela 4 - Medida das distâncias mínimas “ R ” para as quais o observador passa a não resolver individualmente as linhas.

Observador	R
1	R_1
2	R_2
...	...
n	R_n

Nos fornecendo um valor de $R_{\text{Médio}}$ da turma, com esse valor desenvolvemos a análise. Uma vez obtido o valor de R , podemos determinar o critério de Rayleigh por meio da Eq. 3. A qual nos permite, por meio dos valores facilmente mensuráveis – da separação entre os objetos observados (x) e a distância ao objeto observado (R) – o cálculo do ângulo máximo de resolução ou critério de Rayleigh.

Todos passos, assim como as tabelas para utilização na aplicação, estão disponíveis no produto educacional trazido no Apêndice.

4.1.5 – Aplicação do Pós-Teste – 5ª FASE

Esta última fase, teve a intenção de avaliar se a metodologia utilizada nas fases anteriores é capaz de contribuir para uma aprendizagem significativa da difração e dos fenômenos ondulatórios relacionados.

Para tal, foi realizada a aplicação do mesmo teste aplicado anteriormente (Ver Tab.1) como pós teste, com a intenção de comparar os resultados e verificar os possíveis avanços como forma de garantir a eficácia da metodologia proposta. Utilizamos 2 turmas de controle, nas quais foram aplicadas as mesmas atividades das Fases 1 e 2. Contudo na Fase 3 não foi feita a contextualização com o critério de Rayleigh, nem foi realizado o experimento para determinação do poder de resolução

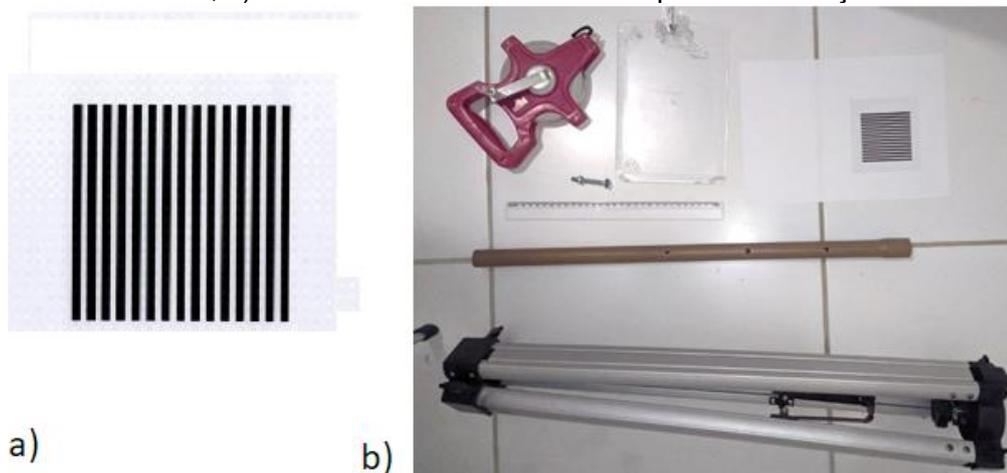
dos estudantes. Mas que realizaram também, pré e pós testes, assim como as turmas de aplicação.

4.2 – Materiais

Para contextualização do problema do poder de resolução, foi elaborada uma proposta simples, com materiais de fácil acesso e de simples montagem e aplicação, que utiliza os seguintes materiais:

1. Folha impressa com o padrão de linhas²⁸. Ver Fig.45a.
2. Prancheta para fixação da folha.
3. Régua de Material Translúcido/Transparente.
4. Trena (30m).
5. Tripé/Base de fixação do conjunto.
6. Porca e Parafuso para fixação da prancheta.
7. Tubo de PVC.
8. Smartphone com câmera para registro do diâmetro da pupila.

Figura 45 – Em a) aparece o padrão de linhas montado para aplicação do roteiro. E ao lado direito, b) mostra os materiais utilizados para a realização.



O resultado final da montagem aparece na Figura 42. A montagem é relativamente simples, mas a descrição detalhada da montagem, assim como possíveis adaptações e comentários de algumas dificuldades são apresentados no Apêndice 2.

²⁸ Assegure que a separação entre as linhas é de 2mm na impressão. Padrões para download e impressão disponíveis no endereço
<https://drive.google.com/drive/folders/12Dk_hyYJmkcxsoR7gcQx-H3NO8HfzhD1?usp=sharing>

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, sobre a apresentação e análise dos resultados obtidos cabe estabelecermos a seguinte divisão: Irei descrever inicialmente os resultados quantitativos da pesquisa. Aqueles referentes ao estudo e determinação do critério de Rayleigh, investigando a eficácia da proposta experimental para determinação deste parâmetro. Em conjunto à análise da eficácia do método utilizado para sua determinação.

Em seguida, faremos uma análise dos resultados dos pós testes, quando comparados aos pré testes, buscando estabelecer correlações de natureza quantitativa a respeito das respostas dos estudantes. Realizando uma análise comparativa dos resultados obtidos nos pré e pós testes aplicados nas turmas do ensino médio.

A seguir, algumas fotos dos momentos de aplicação do experimento no CEPMCS (Ver Fig.46) e Colégio Dínamo (Ver Fig.47).

Figura 46 – Aplicação da proposta experimental no pátio do Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana – Aramari (BA)



Figura 47 – Aplicação da proposta experimental no Colégio Dinamo – Alagoinhas (BA)



5.1 – Resultados da Proposta Experimental

A partir aplicação da proposta como descrita na secção anterior, foram obtidas as distâncias limite para cada observador (R), ou seja, a distância em que ele perde a resolução do espaçamento entre as linhas escuras, dados que são apresentados na Tab.5.

Tabela 5 – Valores das distâncias em que os observadores perdem resolução do espaçamento entre as linhas escura do padrão (R)

N	DÍNAMO (m) ($\pm 0,005m$)	CEPMCS A (m) ($\pm 0,005m$)	CEPMCS B (m) ($\pm 0,005m$)	MPASTRO 6 (m) ($\pm 0,005m$)	FÍSICA IV (m) ($\pm 0,005m$)	MPASTRO 7 (m) ($\pm 0,005m$)
1	11,8	9,9	11,0	11,6	8,3	12,0
2	8,4	10,5	8,1	11,0	9,6	9,5
3	13,1	10,0	13,4	11,9	7,2	10,2
4	13,0	9,3	10,1	13,1	9,8	10,1
5	11,8	9,1	8,8	9,9	9,5	1,4
6	8,1	10,8	11,2	10,0	10,5	12,0
7	10,5	9,6	8,6	9,4	10,7	23,0
8	8,7	6,5	8,9	9,2	7,9	9,2
9	9,3	11,9	8,8	12,8	8,7	11,0
10	9,5	7,0	8,9	13,3	8,4	9,6
11	9,5	13,5	4,9	10,4	10,1	
12	9,2	11,3	9,8	9,7	7,4	
13	10,0	14,2	9,9	12,8	9,9	
14	12,7	13,2	7,2	8,4		
15	10,7	10,0	9,9	15,1		
16	8,9	5,1	9,6	7,0		
17	10,2	9,4	11,6	11,1		
18	11,0	10,5	11,0	11,8		
19	13,7		10,0			
20	9,4		9,8			
21			8,6			
Média	10,5	9,5	10,1	11,0	9,1	10,8
Desvio Padrão	1,7	2,3	1,7	2,0	1,2	5,2

Com a média dessas distâncias e valor da separação das fendas (x) foi obtido por meio da Eq. 3 o valor experimental do critério de Rayleigh (θ_E), o qual, aparece nas Tabelas 6 e 7 em comparação com o valor teórico (θ_T). Obtido por meio da Eq. 2 calculado utilizando o diâmetro médio das pupilas (d) em cada momento de aplicação do experimento, como mostra a Fig. 44, e tomando como comprimento de onda um valor médio $\lambda = 550nm$, faixa de maior sensibilidade do olho humano. Foi possível

ainda mensurar os relativos erros percentuais ($E\%$), comparando os valores previstos pela teoria e os obtidos pela metodologia proposta.

Tabela 6 - Resultados da metodologia nos colégios.

	Dínamo	CEPMCS Turma (A)	CEPMCS Turma (B)
R (m)	$10,5 \pm 0,3$	$9,5 \pm 0,6$	$10,1 \pm 0,3$
d (mm)	$3,0 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,5$
θ_E (rad)	$(1,90 \pm 0,25) \cdot 10^{-4}$	$(2,11 \pm 0,26) \cdot 10^{-4}$	$(1,98 \pm 0,25) \cdot 10^{-4}$
θ_T (rad)	$(2,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
$E\%$	14,6%	6,1%	11,2%

x (Separação das Linhas) = 2mm

Tabela 7 - Resultados da metodologia com a turma de Física IV e do MPASTRO.

	Turma 6 MPASTRO	Turma Física IV	Turma 7 MPASTRO Aplicação Remota
R (m)	$11,0 \pm 0,5$	$9,1 \pm 0,6$	$10,8 \pm 1,7$
d (mm)	$4,0 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,5$
θ_E (rad)	$(1,81 \pm 0,31) \cdot 10^{-4}$	$(2,21 \pm 0,20) \cdot 10^{-4}$	$(1,85 \pm 0,35) \cdot 10^{-4}$
θ_T (rad)	$(1,67 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$	$(2,24 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$	$(2,24 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
$E\%$	7,8%	1,4%	17,2%

x (Separação das Linhas) = 2mm

Quando comparamos os valores previstos pela teoria com os valores obtidos experimentalmente por meio da metodologia proposta, obtive valores que podem ser considerados aceitáveis do erro relativo percentual, uma vez que representam uma variação de uma ordem de grandeza pequena, dadas as condições de aplicação e a própria simplicidade da proposta.

Darei um destaque em especial ao desvio e erro percentual às medidas encontradas na aplicação com a Turma 7 do MPASTRO, que podem ser justificadas de certo modo, pela natureza da orientação e condições de aplicação do experimento. Na qual os mestrados do programa, precisaram replicar apenas com orientação do roteiro, e especialmente com os recursos disponíveis em casa, a atividade proposta. Haja vista, a condição excepcional que passamos na data da aplicação, a quarentena/isolamento social devido a pandemia de COVID-19.

Sobretudo, mesmo com tais dificuldades os resultados apresentados, por esse grupo, em conjunto com as outras aplicações podemos afirmar que a

metodologia empregada na realização do experimento e cálculo do critério de Rayleigh é razoável para alcançarmos os objetivos de contextualização do conteúdo com os estudantes.

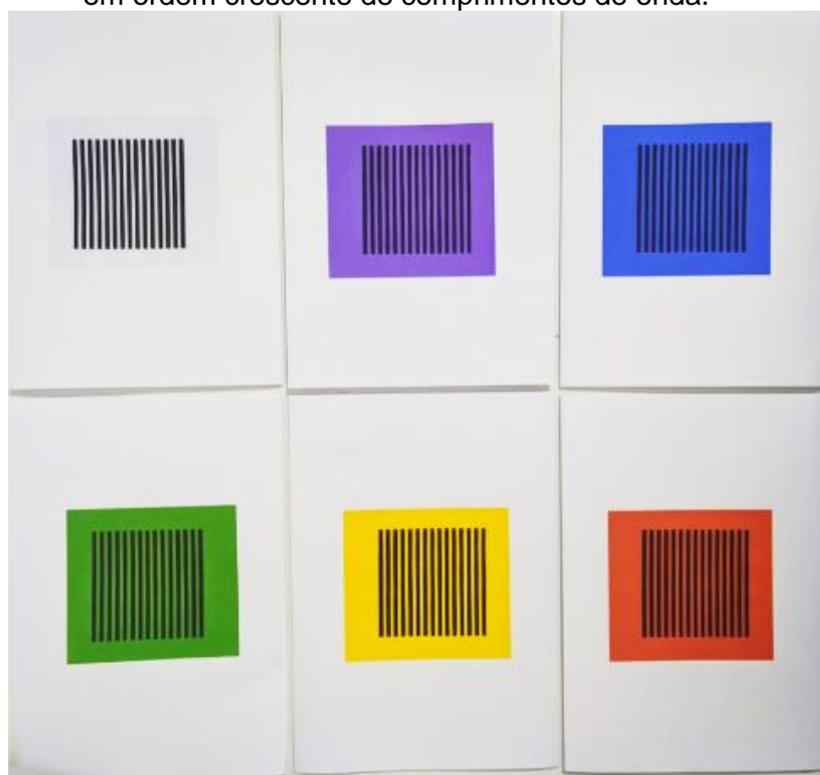
5.1.1 – Resultados Adicionais à Proposta Experimental

A aplicação com os estudantes e professores, rendeu bons frutos quando observamos os dados, no entanto, motivado pelo interesse em estabelecer a relação do comprimento de onda com o poder de resolução, foi elaborada uma proposta complementar.

A qual é apresentada aqui ainda com resultados preliminares, que tem a intenção de correlacionar o valor do critério não só com a separação e distância do arranjo experimental – como permitido pela Eq. 3 – mas utilizando a Eq. 2 para estudar empiricamente a correção entre o comprimento de onda λ e o valor critério θ .

Para tal, fiz um teste utilizando a mesma metodologia para determinação do critério utilizada anteriormente. Mas desta vez, utilizando mais 5 folhas impressas com padrões de cores distribuídas ao longo do espectro visível, (Ver Fig. 48). Tendo a intenção de sondar uma possível evidência que permita expandir a proposta.

Figura 48 - Folhas utilizadas na realização da proposta complementar ao experimento proposto. Apresentando a folha branca – utilizada anteriormente – seguida de outras cores em ordem crescente de comprimentos de onda.



Da mesma forma, a aplicação me permitiu obter as distâncias máximas nas quais era capaz de resolver a separação entre as linhas. Em outras palavras, a distância em que as linhas escuras espaçadas por linhas em cor, apareciam apenas como um quadrado preenchido em preto, não resolvendo a separação colorida.

Os valores destas distâncias (R), assim como o valor do critério teórico (θ_T), critério experimental (θ_E) e comprimento de onda médio de cada cor, são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Resultados da aplicação preliminar do experimento para as folhas em cores

λ (nm)	410	460	533
R (m)	$12,3 \pm 0,01$	$10,7 \pm 0,01$	$8,9 \pm 0,01$
d (mm)	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$
θ_T (rad)	$(1,67 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(1,88 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,17 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
θ_E (rad)	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-4}$

x (Separação das Linhas) = 2mm

Tabela 9 - Resultados da aplicação preliminar do experimento para as folhas em cores

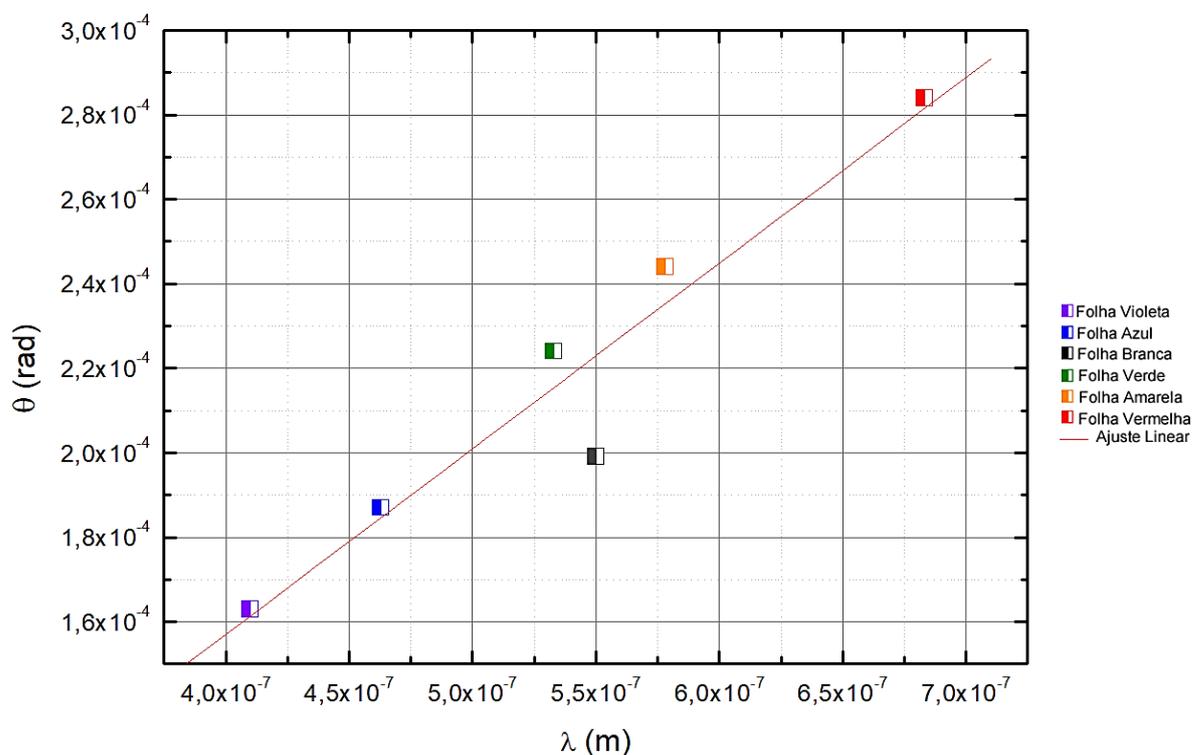
λ (nm)	550	607	680
R (m)	$10,0 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,01$	$7,1 \pm 0,01$
d (mm)	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$
θ_T (rad)	$(2,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,47 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,78 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
θ_E (rad)	$(1,99 \pm 0,26) \cdot 10^{-4}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$2,84 \cdot 10^{-4}$

x (Separação das Linhas) = 2mm

Vale ressaltar que o valor para a folha em preto e branco – na qual utilizamos um valor médio de 550nm – apresentados na tabela, correspondem à média dos valores de R apresentado nas Tab. 6 e 7. E os dados de θ_E para as outras 5 cores além do branco, são apresentados sem barra de erro estatística por não terem sido aplicados em uma quantidade que permita o cálculo do desvio. Pois apliquei sozinho a proposta, na qual passei a ser o observador, carecendo de um maior número de aplicações.

O resultado preliminar obtido permite construir dois gráficos que podem responder sobre a efetividade desta proposta, no que diz respeito à investigação da relação entre o comprimento de onda e o poder de resolução. Possivelmente afetando no valor do θ_E além do valor máximo da distância R , tais relações são mostradas a seguir por meio da construção e análise dos gráficos de θ_E versus λ e R versus λ .

Figura 49 – Gráfico Relacionando o limite de resolução θ_E com cada cor/comprimento de onda λ .



Em um ajuste desenvolvido sob os pontos do gráfico, a melhor equação que descreve os pontos experimentais, foi uma equação do primeiro grau de forma geral escrita na Eq. 4. Cujos coeficientes são apresentados na Tab.10:

$$y = AX + B \quad (4)$$

Tabela 10 – Ajuste linear sob os pontos da curva θ_E versus λ

A	$440,00 \pm 64,14$
B	$(-1,90 \pm 3,48) \cdot 10^{-5}$

Quando comparamos a Eq. 4 com a Eq. 2 que descreve o fenômeno, podemos escrever o coeficiente A como:

$$A = \frac{1,22}{d} \quad (5)$$

Calculando o seu valor a partir do valor médio do diâmetro da pupila no experimento, obtemos:

$$A_{Teórico} = 406,7 \quad (6)$$

Um valor bem próximo ao obtido com os pontos experimentais, apresentado na Tab.10. Permitindo concluir que esta metodologia é também razoável determinar as relações da influência do comprimento de onda com o poder de resolução.

Relacionei também, de forma gráfica, as grandezas R e λ , buscando estabelecer a correlação entre o comprimento de onda médio com as distâncias máximas na qual é possível resolver a separação entre as linhas.

Usando as Eq. 2 e 3 é possível chegar à relação:

$$\frac{x}{R} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Obtendo,

$$R = \frac{xd}{1,22\lambda} \quad (7)$$

Sabendo que o termo $xd/1,22$ equivale a uma constante (C) na nossa situação, linearizamos a equação para obter a curva de uma equação do 1º grau. Fazendo

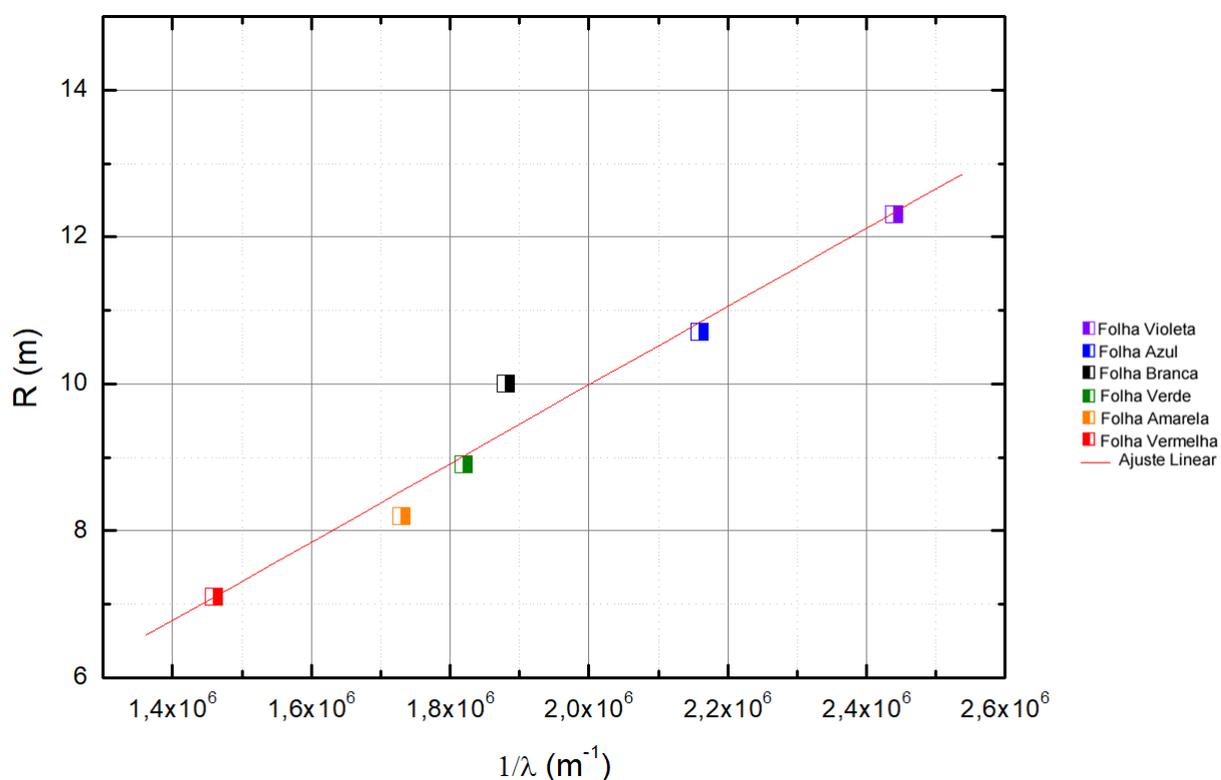
$$R = C \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

Onde,

$$C = \frac{xd}{1,22} \quad (9)$$

Construindo o gráfico que relaciona a distância limite R com o comprimento de onda λ^{-1} obtemos o gráfico:

Figura 50 - Gráfico relacionando as distâncias máximas para qual é possível resolver a separação entre as linhas para cor do padrão.



Em um ajuste linear desenvolvido sob os pontos do gráfico, obtivemos a equação que descreve a curva na forma:

$$y = CX + D \quad (10)$$

Tabela 11 - Ajuste linear sob os pontos da curva *R versus 1/λ*

C	$(5,34 \pm 0,49) \cdot 10^{-6}$
D	$-0,69 \pm 0,96$

Calculando o valor de C por meio da equação 9 obtemos

$$C_{Teórico} = 4,91 \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

Um valor bem próximo ao obtido experimentalmente mostrado na Tab., 11, indicando que esta metodologia pode ser também razoável para determinar as relações do comprimento de onda com a distância máxima em que é possível resolver as linhas.

Seguindo os indícios desta avaliação preliminar da proposta adicional, e motivado por aprimorá-los, com a intenção de apresentar uma estatística sobre esta proposta, aplicado à um público maior. Propus a atividade adicional aos mestrandos da 7ª Turma do MPASTRO. Ainda, de forma remota, devido às condições de isolamento social vividas no período.

Prontamente, 10 membros da turma, realizaram a proposta complementar, e encaminharam as medidas por meio de um formulário online. Com as quais, foi desenvolvida a mesma análise feita sob os dados da aplicação preliminar, e são apresentados a seguir nas Tab. 12 e 13.

Tabela 12 – Resultados da aplicação remota feita pelos mestrandos da 7ª Turma do MPASTRO para as folhas em cores.

λ (nm)	410	460	533
R (m)	$11,6 \pm 0,3$	$8,8 \pm 0,3$	$10,4 \pm 0,3$
d (mm)	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$
θ_T (rad)	$(1,67 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(1,88 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,17 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
θ_E (rad)	$(1,73 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$	$(2,27 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$	$(1,92 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$

x (Separação das Linhas) = 2mm

Tabela 13 - Resultados da aplicação remota feita pelos mestrandos da 7ª Turma do MPASTRO para as folhas em cores.

λ (nm)	550	607	680
R (m)	$10,8 \pm 0,3$	$12,4 \pm 0,3$	$10,8 \pm 0,3$
d (mm)	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$
θ_T (rad)	$(2,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,47 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(2,78 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
θ_E (rad)	$(1,85 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$	$(1,61 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$	$(1,85 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$

Da mesma forma, podemos plotar um gráfico relacionando o limite de resolução (θ_E) com cada cor a partir dos dados fornecidos pelos mestrandos da 7ª turma, que parece na Fig. 51.

Figura 51 – Gráfico Relacionando o limite de resolução θ_E com cada cor/comprimento de onda λ com os dados fornecidos pela aplicação dos mestrandos da 7ª turma.

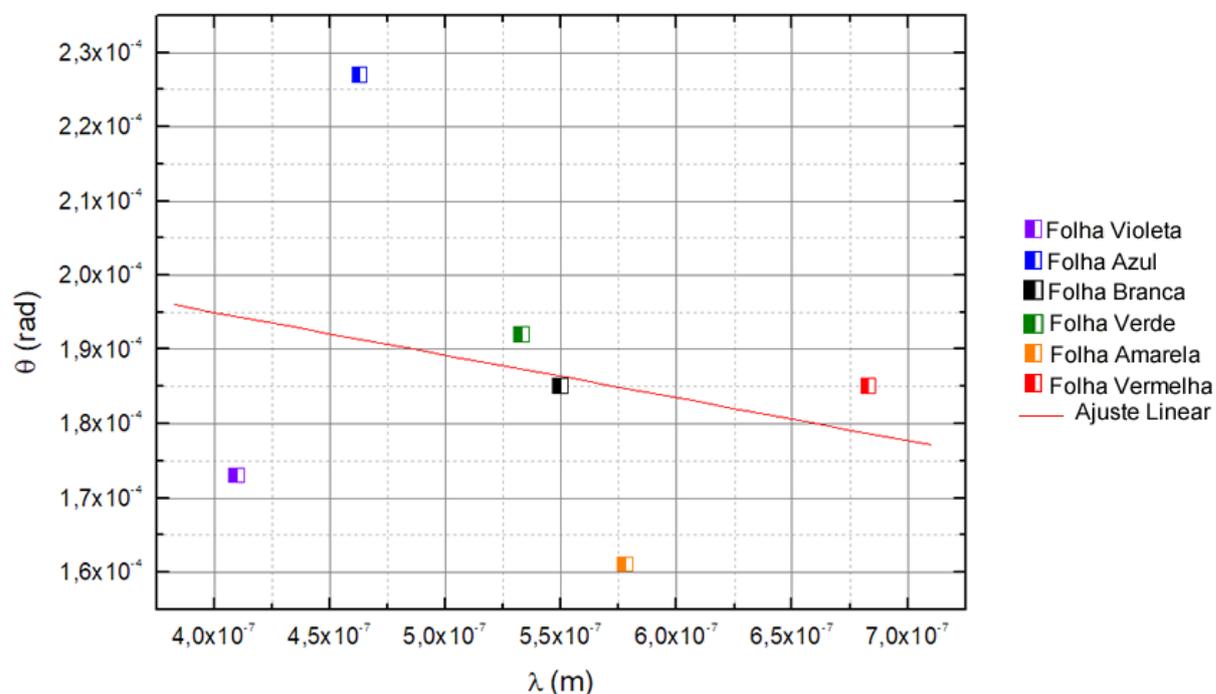


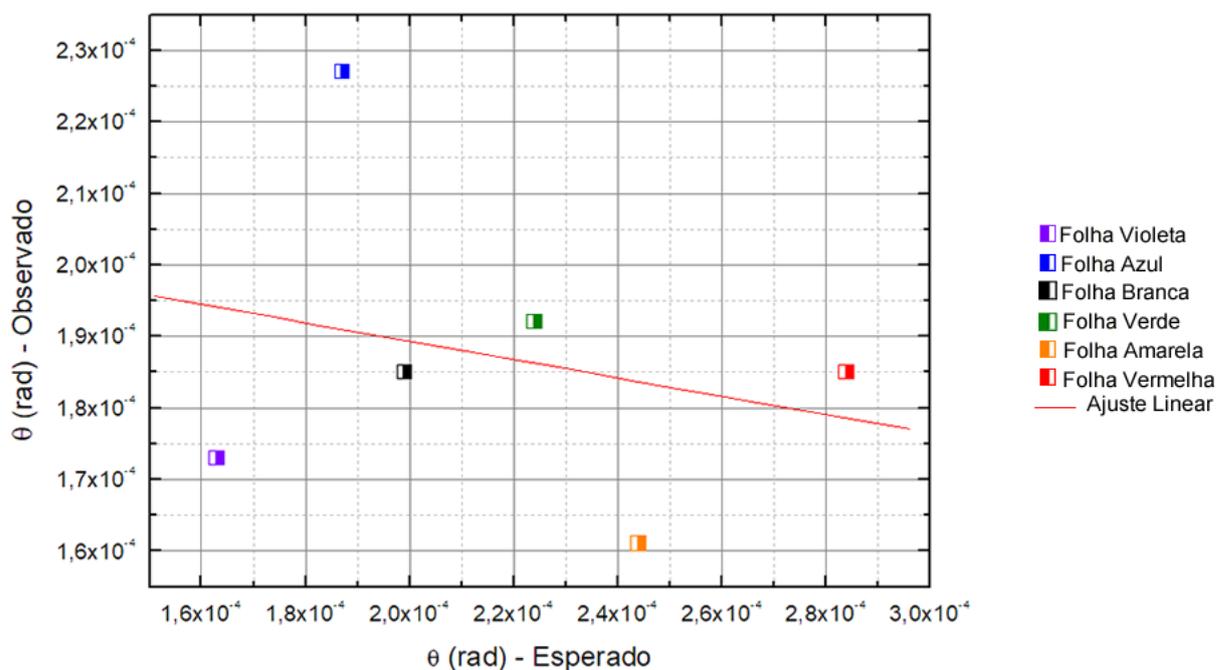
Tabela 14 - Ajuste linear sob os pontos da curva θ_E versus λ na aplicação remota

A	$-57,40 \pm 114,67$
B	$(21,81 \pm 6,22) \cdot 10^{-5}$

Realizando a mesma análise feita com a equação 4, e comparando com o valor teórico previsto para A (Ver Eq. 6), podemos perceber que os resultados obtidos na aplicação remota realizada pelos membros da 7ª Turma não vão na mesma direção dos resultados obtidos na avaliação preliminar apresentada na Fig. 50.

Essa observação pode ser constatada quando buscarmos determinar o coeficiente de correlação entre os valores obtidos para θ_E . Plotando o gráfico do valor esperado (Resultado Preliminar) versus o valor observado (Resultado obtido pela 7ª turma), obtemos o gráfico da Fig. 52.

Figura 52 – Correlação feita entre os valores do critério de Rayleigh obtido para cada cor na proposta adicional. Os resultados da aplicação preliminar como os valores esperados, e os resultados da aplicação feita pelos mestrandos da 7ª Turma do MASTRO, como os valores observados.



Com estes dados, obtivemos um valor para o coeficiente de correlação (ρ - coeficiente de correlação de Pearson) igual a -0,24, qual, de acordo com a literatura, indica uma correlação desprezível (MUKAKA M., 2016). Não nos permitindo afirmar que a proposta adicional possa ser utilizada no sentido que a análise preliminar havia indicado.

5.2 – Resultados da Proposta Didática

A metodologia completa, composta pela aplicação do pré-teste, apresentação dos conteúdos da ondulatória, apresentação da difração, realização da proposta experimental e pós-teste, foi aplicada em 3 turmas de ensino médio em 2 colégios.

Como citado anteriormente, foram utilizadas duas turmas de controle (uma em cada colégio) para análise dos resultados, as quais passariam por todas as etapas da metodologia de forma semelhante, exceto pela apresentação do critério de Rayleigh e da realização do experimento. Isto, com a intenção de avaliar se aplicação proposta experimental e contextualização com o critério de Rayleigh apresenta alguma vantagem quando comparada aos resultados da turma de controle.

Neste momento, para a análise dos pré e pós testes agrupamos as respostas de cada questão em 3 tipos, de acordo com os critérios apresentados na Tab. 15.

Tabela 15 – Classificação criada para as respostas dos estudantes às questões do pré-teste

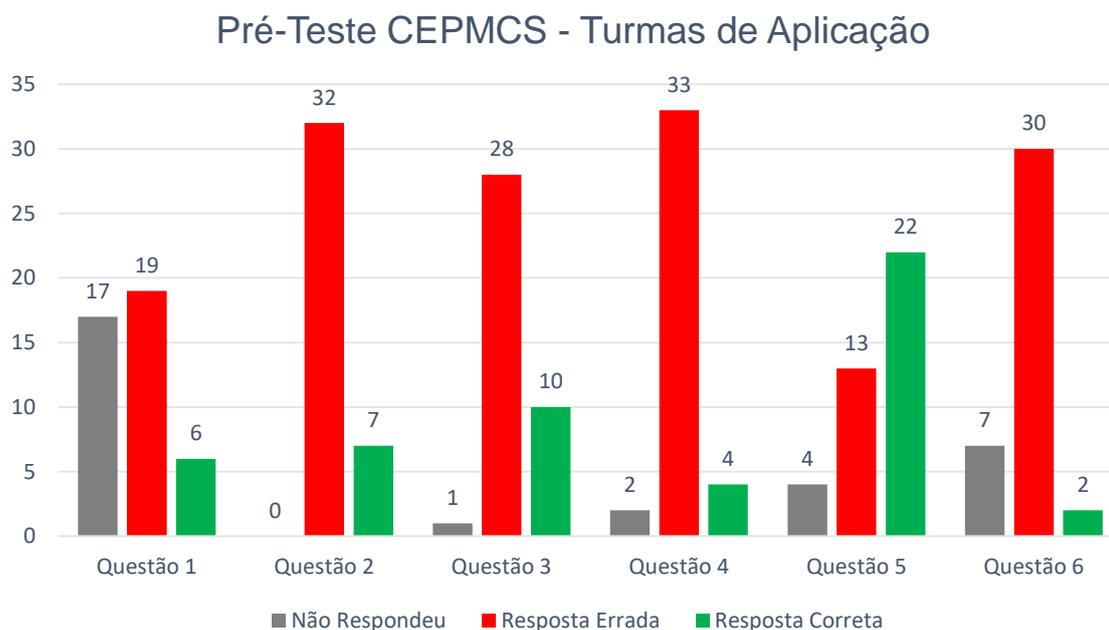
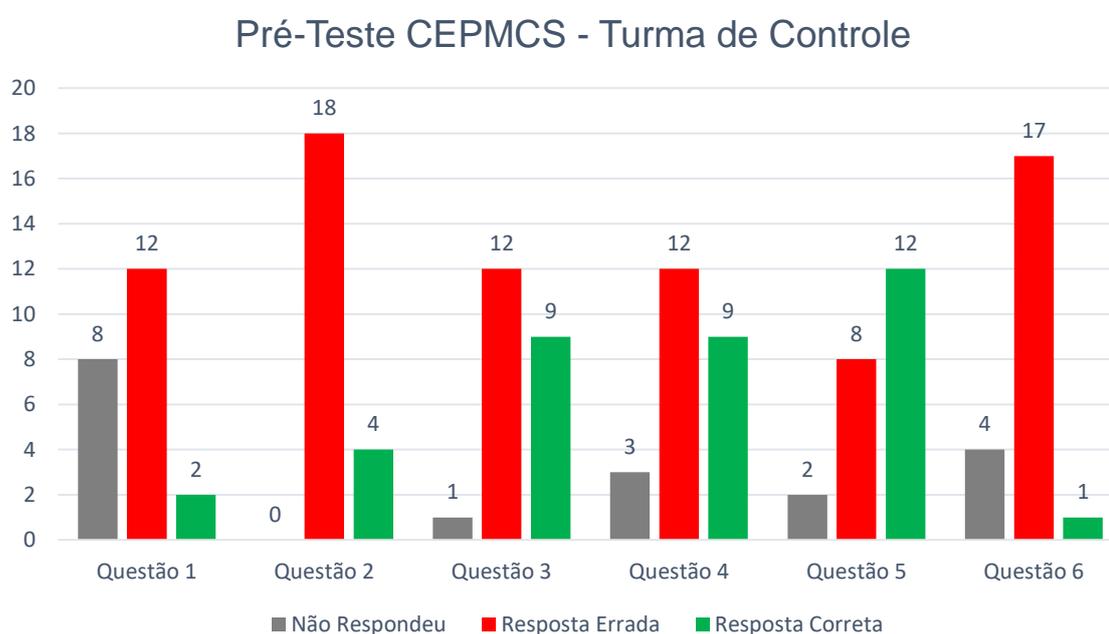
Tipo A	Respostas em que os estudantes alegam não saber a explicação do fenômeno proposto ou simplesmente não responderam.
Tipo B	Respostas fisicamente erradas, redundantes ou em que os estudantes utilizaram elementos de outro fenômeno ondulatório para interpretar a situação.
Tipo C	Respostas em que os estudantes ou apresentaram a interpretação correta, ou apresentaram elementos bem próximos à esta interpretação.

A seguir, são apresentados os resultados dos pré-teste, pós-teste e a variação no número de acertos das turmas de aplicação em relação às turmas de controle, agrupados por instituição de ensino.

5.2.1 – Pré-Teste

A análise dos testes foi extremamente construtiva para levantar algumas concepções prévias que os alunos apresentaram a respeito dos fenômenos, o que mais tarde viria a se concretizar como uma ajuda na construção da proposta metodológica e dos pontos a dar atenção em sala de aula visando a superação das dificuldades.

Para a análise, foram agrupados os testes dos estudantes do CEPMCS das turmas A e B (Matutino) em um gráfico, e B (Vespertino – Turma de Controle) em outro. Posteriormente os testes do Colégio Dínamo das turmas A em um gráfico, enquanto B (Turma de Controle) em outro.

Figura 53 – Análise das respostas do pré-teste do CEPMCS. Aplicado no 2ª A e B Matutino**Figura 54** - Análise das respostas do pré-teste do CEPMCS. Aplicado à turma de controle 2ª A Vespertino

Nos pré-testes do CEPMCS foi possível perceber primeiramente uma homogeneidade inicial entre os acertos e erros – guardando as devidas proporções – quando comparados os resultados das turmas de aplicação em relação às turmas de controle, algo que favorece, a posterior análise e comparação com os resultados no pós-teste.

A seguir são apresentados os resultados do pré-teste nas turmas do Colégio Dínamo, na turma de aplicação (2º A) e de controle (2ºB).

Figura 55 - Análise das respostas do pré-teste no Colégio Dínamo. Aplicado no 2ª A.

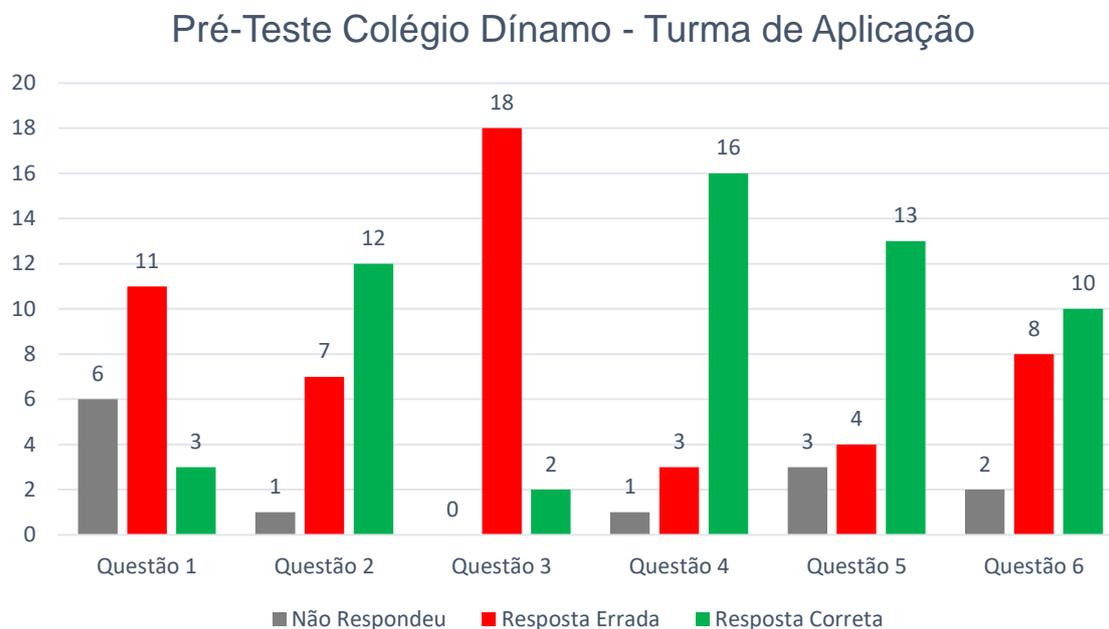
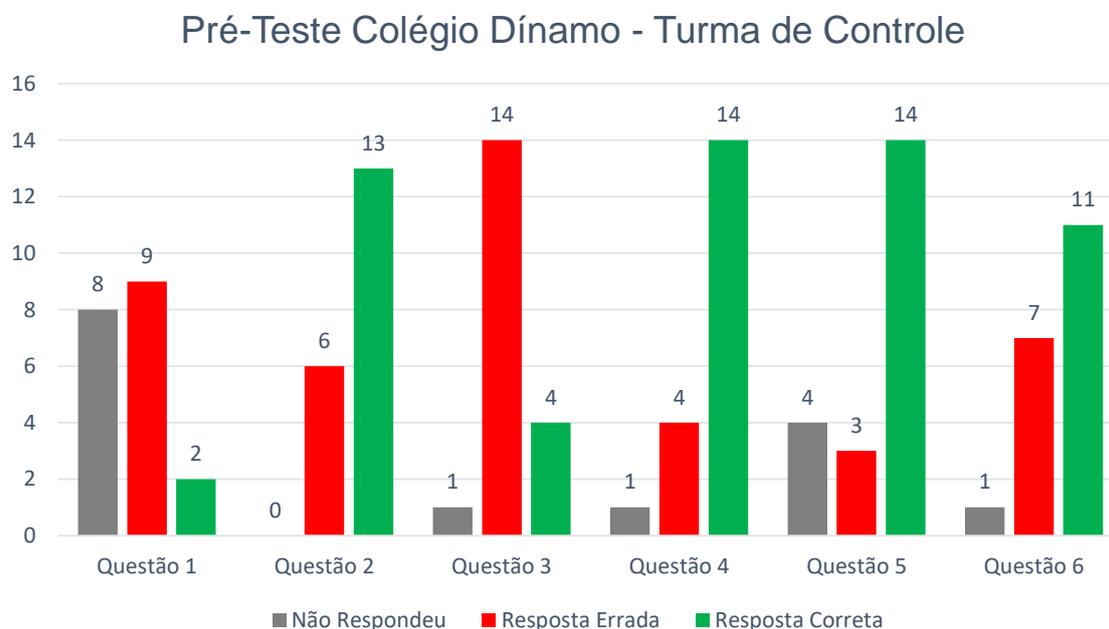


Figura 56 - Análise das respostas do pré-teste no Colégio Dínamo. No 2ºB Turma de controle.



A mesma homogeneidade inicial nos resultados do colégio anterior, também é perceptível quando comparamos a turma de aplicação e controle do Colégio Dínamo, favorecendo também, a posterior análise e comparação com os resultados no pós-teste. A principal diferença, quando comparamos os colégios, reside no

número de acertos em algumas questões. Acredito que este fator se deva à presença de conteúdos da ondulatória no 9º Ano do ensino fundamental desta instituição.

5.2.2 – Pós-Teste

São apresentados a seguir, os resultados dos pós-testes aplicados nas turmas A e B do CEPMCS, turmas de aplicação e controle, e em seguida os resultados no Colégio Dínamo, das turmas de aplicação e controle.

Figura 57 - Análise das respostas do pós-teste no CEPMCS. Aplicado às turmas 2ºA e 2ºB.

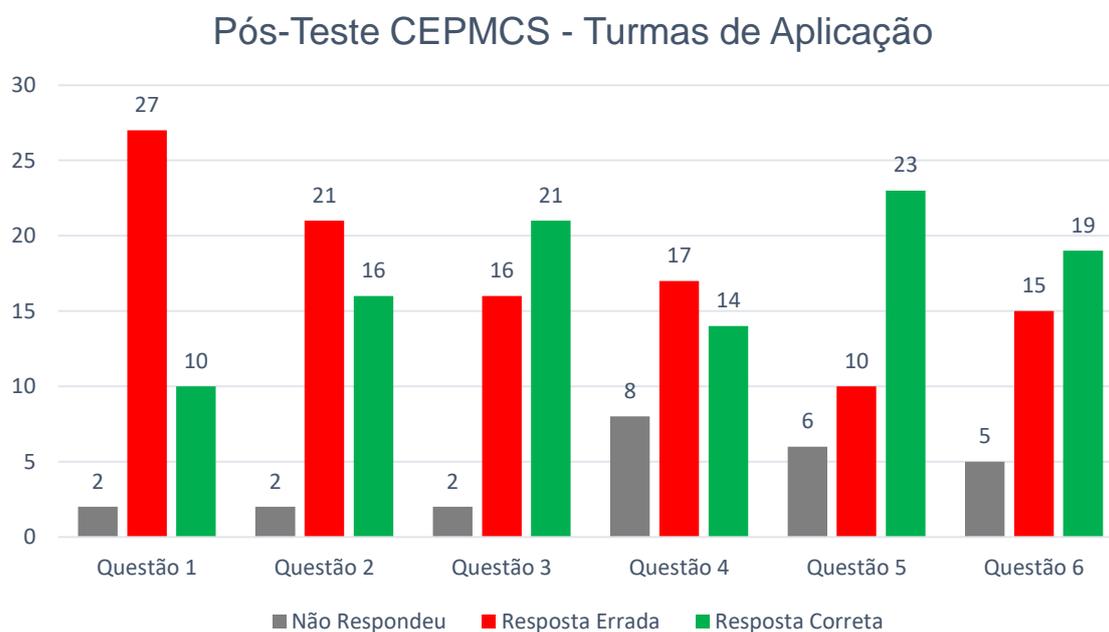


Figura 58 - Análise das respostas do pós-teste no CEPMCS. Aplicado à turma de controle 2ª A Vespertino.

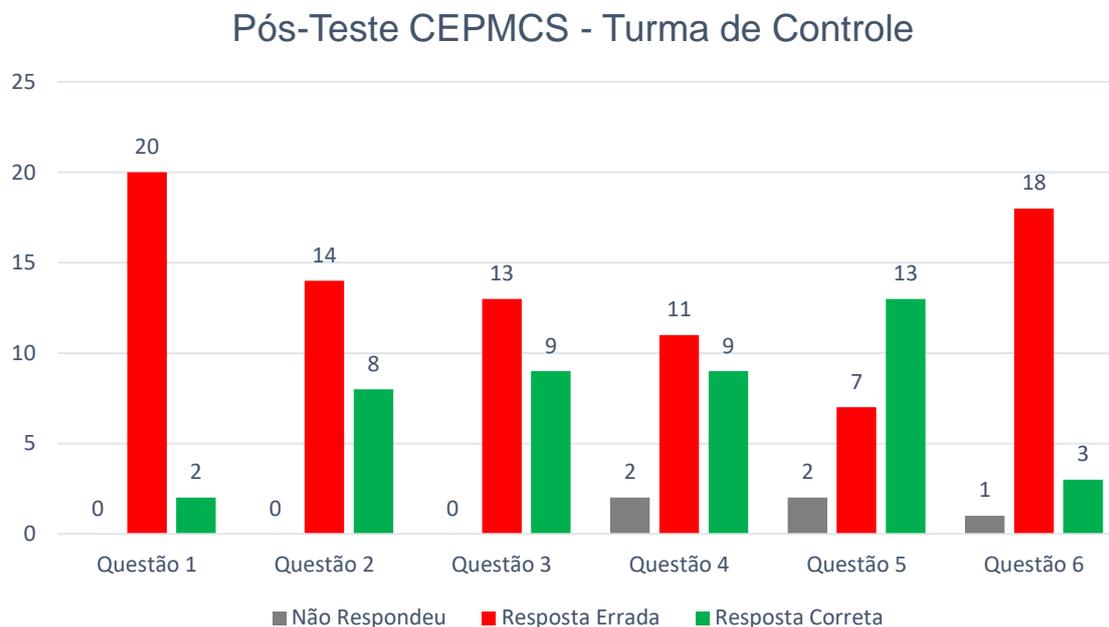


Figura 59 - Análise das respostas do pré-teste no Colégio Dínamo. Aplicado no 2ª A.

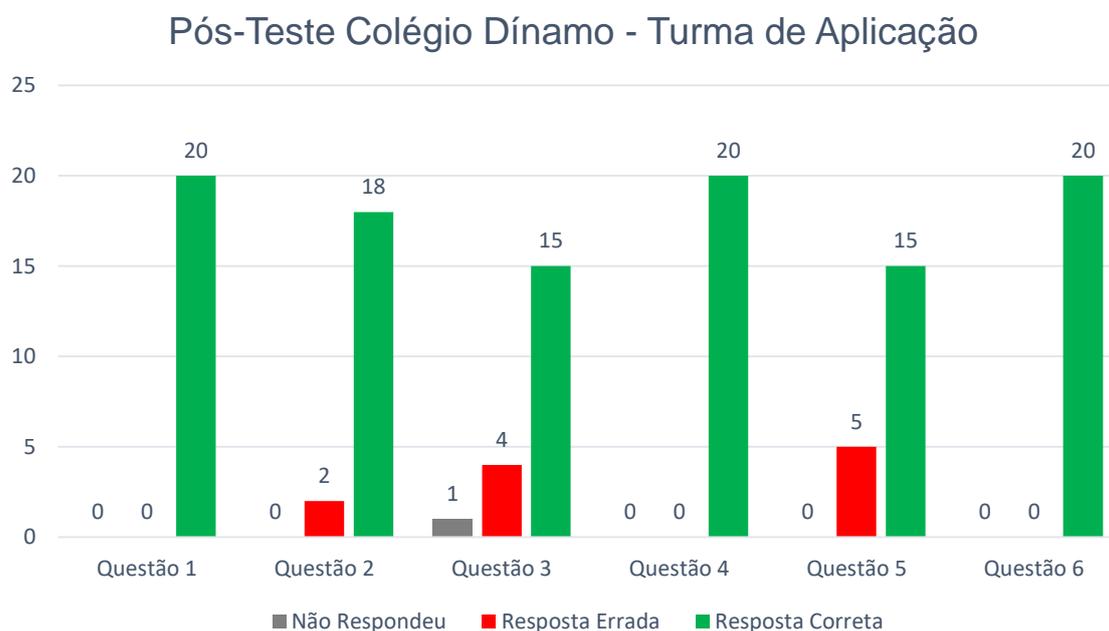
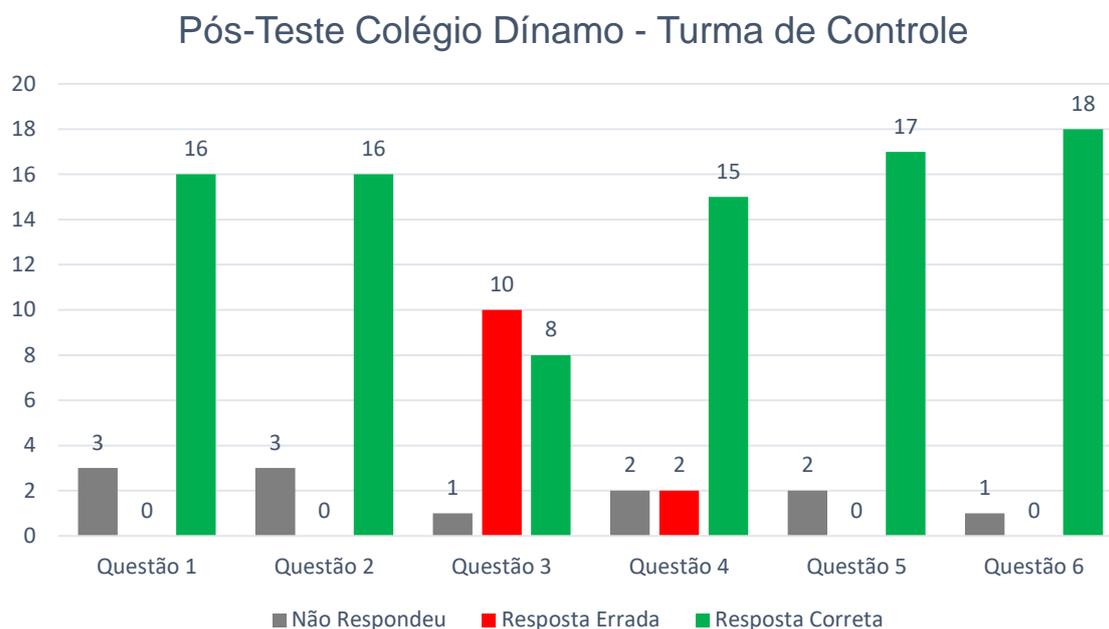


Figura 60 - Análise das respostas do pós-teste no Colégio Dinamo. Aplicado na turma de controle 2ª B.



5.2.3 – Comparativo Pré e Pós-Teste do CEPMCS e Colégio Dinamo

Com o interesse de analisar a variação no número de acertos nos pré e pós teste nas turmas de aplicação e controle, objetivando avaliar a eficiência da metodologia no que se propõe. São apresentados os gráficos com a análise sob a variação dos acertos da turma de aplicação em comparação à turma de controle.

Figura 61 – Variação de acertos nas questões dos testes no CEPMCS.

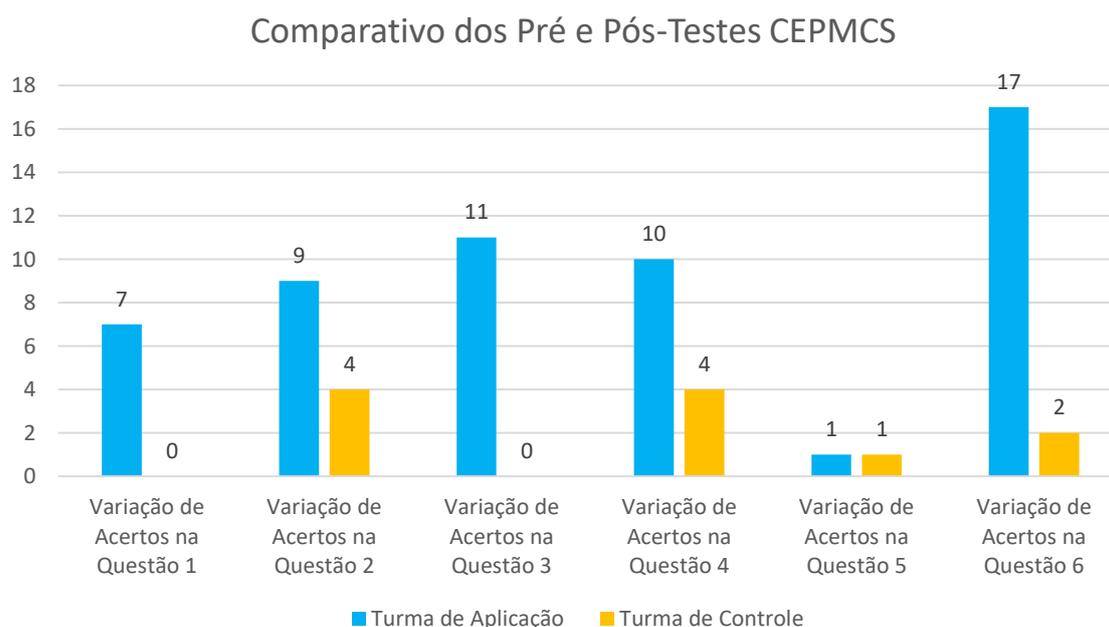
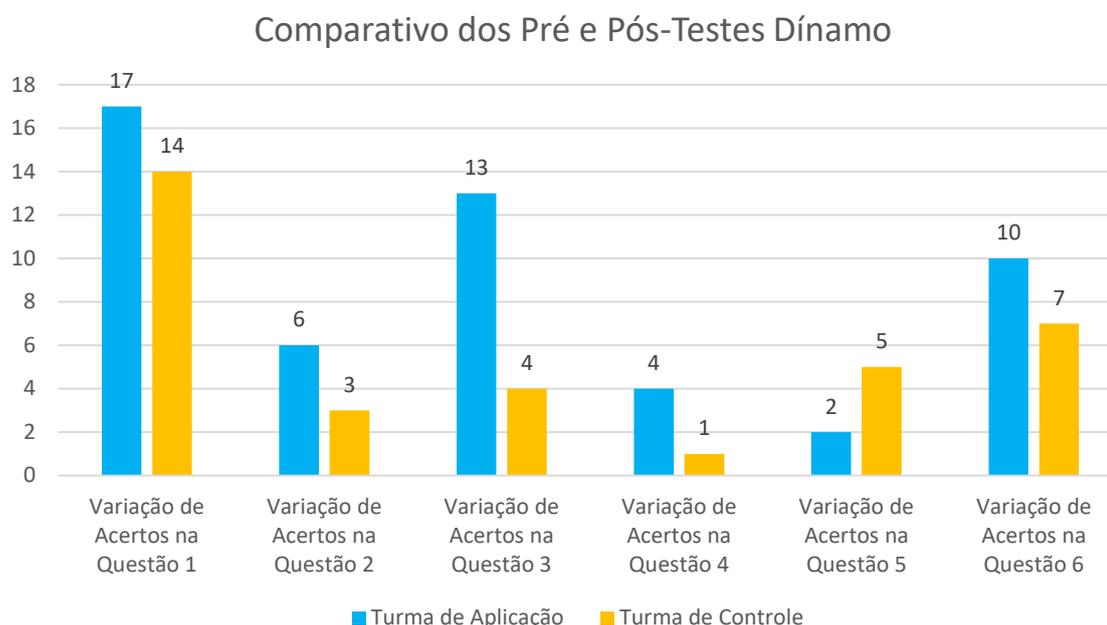


Figura 62 - Variação de acertos nas questões dos testes no Colégio Dínamo.

Os resultados permitem determinar a variação percentual dos acertos nas duas turmas (Aplicação e Controle), os quais são apresentados na Tab. 16 e 17 nos dois colégios.

Tabela 16 – Variação percentual do número de acertos entre pré e pós testes do CEPMCS.

Turma	Varição Percentual de Acertos
2° AM e BM (Turmas de Aplicação)	+102%
2° AV (Turma de Controle)	+19%

Tabela 17 - Variação percentual do número de acertos entre pré e pós testes do Dínamo.

Turma	Varição Percentual de Acertos
2° A (Turma de Aplicação)	+92%
2° B (Turma de Controle)	+60%

Os resultados obtidos já são capazes de indicar uma diferença favorável na direção às turmas de aplicação no Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana. A turma de aplicação apresentou um aumento de 83% a mais no número de acertos que a turma de controle. Enquanto no Colégio Dínamo, este aumento foi de 32%, ainda indicando uma aprendizagem maior nas turmas de aplicação em relação à turma de controle. Tais resultados, podem indicar que a aplicação da proposta favoreceu a aprendizagem.

A diferença no aumento percentual, de 83% no CEPMCS para 32% no Colégio Dínamo acredito dizer respeito às discrepâncias existentes entre os ambientes de ensino, os alunos da rede privada de ensino apresentavam carências consideravelmente menores a serem superadas do ponto de vista de conceitos básicos em matemática e conceitos de ciência, quando comparados aos estudantes da rede pública.

A análise percentual feita, indica que houve um maior número de acertos nas turmas de aplicação, sinalizando uma diferença de aprendizagem entre estes grupos. Contudo, não podemos ainda assegurar que esta diferença de aprendizagem, é devida à proposta experimental aplicada. É preciso tratar estes dados utilizando uma abordagem quantitativa e estatística, para assegurar que a diferença apresentada, não é de natureza randômica.

5.2.4 – Análise Quantitativa Comparação entre Grupos

Após a realização de alguns comparativos entre os resultados das duas turmas, posso apresentar alguns valores a respeito das médias de acertos de cada um dos grupos, que permitem determinar a média de acertos por aluno em cada uma das questões, assim como o desvio padrão, apresentado na média de acertos por questão no pré-teste (Ver Tab.18) e do pós teste (Ver Tab.19).

Tabela 18 – Apresentação das médias de acerto por questão do pré-teste nas 4 turmas.

PRÉ-TESTE				
	Turma de Aplicação (CEPMCS)	Turma de Controle (CEPMCS)	Turma de Aplicação (Dínamo)	Turma de Controle (Dínamo)
Questão 1	0,15	0,05	0,15	0,10
Questão 2	0,18	0,10	0,60	0,68
Questão 3	0,26	0,23	0,10	0,21
Questão 4	0,10	0,23	0,80	0,73
Questão 5	0,56	0,31	0,65	0,73
Questão 6	0,05	0,03	0,50	0,57
N	39	22	20	19
Média de Acertos em Todo Teste	0,22	0,16	0,47	0,51
Desvio Padrão	0,18	0,11	0,28	0,28

Tabela 19 - Apresentação das médias de acerto por questão do pós-teste nas 4 turmas.

PÓS-TESTE				
	Turma de Aplicação (CEPMCS)	Turma de Controle (CEPMCS)	Turma de Aplicação (Dínamo)	Turma de Controle (Dínamo)
Questão 1	0,26	0,09	1	0,8
Questão 2	0,41	0,36	0,9	0,8
Questão 3	0,54	0,41	0,75	0,4
Questão 4	0,36	0,41	1	0,25
Questão 5	0,59	0,59	0,75	0,85
Questão 6	0,49	0,14	1	0,9
N	39	22	20	19
Média de Acertos em Todo Teste	0,22	0,16	0,47	0,51
Desvio Padrão	0,18	0,11	0,28	0,28

Foi feita na seção anterior deste trabalho diversas comparações em gráficos que dão indícios da relevância do trabalho nos locais de aplicação. Contudo, com a intenção de assegurar a relevância da metodologia proposta de forma quantitativa e visando avalia-lo de forma a garantir sua eficácia, afastando da conclusão uma possível variação estocástica, utilizamos o teste *t* (teste de *Student*) como ferramenta para análise estatística dos dados.

Utilizamos este teste, de comparação de médias em grupos independentes, como forma de avaliação que visa nos distanciar de interpretações abusivas ou conclusões inocentes. Recorrendo para tal, a este teste de hipótese, capaz de comparar médias de valores, e quantificar se as diferenças entre elas são estatisticamente conclusivas (ALVES C., 2017).

A aplicação deste método, carece da delimitação de duas hipóteses, a primeira delas a hipótese nula (H_0) e a segunda, a hipótese alternativa (H_A). Aqui definidas como aparece na Tab.20:

Tabela 20 – Quadro das regras de decisão

H_0 (Hipótese nula)	Aquela que se rejeitada, confirma a hipótese científica
H_A (Hipótese alternativa)	Aquela assumida, caso haja rejeição da H_0

Neste trabalho, as hipóteses H_A e H_0 correspondem às intepretações da Tab.21:

Tabela 21 – Quadro das regras de decisão aplicadas ao presente trabalho

H_0 (Hipótese nula)	A metodologia aplicada não contribui para o aprendizado
H_A (Hipótese alternativa)	A metodologia aplicada, contribui para o aprendizado.

Para permitir o contraponto entre H_0 e H_A faz-se necessário o uso dos resultados da turma de controle e aplicação num teste bilateral. Assumir que a hipótese de nulidade é verdadeira, quer dizer que a comparação entre as médias do grupo 1 (Aplicação) em relação ao grupo 2 (Controle) indica que a prática desenvolvida no trabalho não oferece um resultado estatisticamente conclusivo. Apresentando resultados que não permitem distinguir de forma significativa os resultados da turma de controle em relação à turma de aplicação, simbolicamente ($\mu_1=\mu_2$) (LOUREIRO & GAMEIRO, 2011).

Em outras palavras, dizer que $\mu_1=\mu_2$, indica que os resultados obtidos são indiferentes à aplicação da metodologia. Contudo, se há rejeição de H_0 temos resultados que indicam que a aplicação da proposta apresenta resultados que apontam na direção da hipótese alternativa. Efetivando a proposta experimental como uma prática adequada a ser assumida ($\mu_1\neq\mu_2$), ou seja, a metodologia aplicada apresenta resultados significativos na direção da rejeição de H_0 .

Nos testes de hipótese então, a hipótese nula é considerada verdadeira até evidência do contrário e apresentando baixa probabilidade de erro. Esta probabilidade é quantificada na forma do nível de significância (α), que expressa a probabilidade de rejeitar a H_0 quando ela é de fato verdadeira, classificado como Erro Tipo I. Que será utilizado neste trabalho.

O valor definido para esta variável, depende do risco envolvido na rejeição incorreta de H_0 , em geral frequentemente aceito como 5%. A decisão de aceitar ou rejeitar a H_0 se dá em torno do valor p , que é simplificada, uma quantificação da probabilidade de errar ao rejeitar a hipótese de nulidade (FERREIRA & PATINO, 2015).

No nosso caso: a probabilidade em rejeitar a hipótese de a metodologia utilizada não contribuir para o aprendizado. Desta forma:

Tabela 22 – Quantificando as probabilidades (valor- p) no teste- t

Para $p < 5\%$	Rejeitamos H_0
Para $p > 5\%$	Aceitamos H_0

Sendo assim, se p é menor que o nível de significância, é correto rejeitar H_0 . Definido isto então, podemos partir para o teste, utilizando a Eq. 12 para cálculo do da estatística t

$$t = \frac{\bar{y}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad (12)$$

onde:

\bar{y}_d : Média das diferenças;

S_d : Desvio padrão das diferenças

n : Tamanho da amostra.

Para obtenção do resultado Teste t, facilitando a aplicação da Eq. 12, e análise dos resultados, utilizei nesta fase a ferramenta *QuickCalcs*²⁹ disponibilizada no portal GraphPad.

Para os valores de entrada, utilizei os dados das Tab. 18 e 19 no modo de entrada “média, desvio padrão e N (*mean, SD and N*)” e utilizando o modo para dados não pareados (*Unpaired t test*). A configuração utilizada, e interface da ferramenta é exibida na Fig. 63.

Figura 63 – Configuração utilizada na ferramenta *t test calculator*

The screenshot shows the configuration interface for the t test calculator, divided into four numbered sections:

- 1. Choose data entry format:** Four radio button options:
 - Enter up to 50 rows.
 - Enter or paste up to 2000 rows.
 - Enter mean, SEM and N.
 - Enter mean, SD and N.** (Selected)
 A red warning message below reads: "Caution: Changing format will erase your data."
- 2. Enter data:** A link "Help me arrange the data." followed by four input fields labeled "Label:", "Mean:", "SD:", and "N:", each with a corresponding empty box.
- 3. Choose a test:** Two radio button options:
 - Unpaired t test.** (Selected)
 - Welch's unpaired t test (used rarely).
 A note below states: "(You can only choose a paired t test if you enter individual values.)" with a link "Help me decide."
- 4. View the results:** Two orange buttons: "Calculate now" and "Clear the form".

Tendo obtido o valor de t para as médias, precisamos verificar e quantificar se este valor corresponde a uma estatística significativa, ou seja, se está dentro do nível de significância considerado aceitável. Que pode ser obtido consultando uma tabela da distribuição t de *Student*. Que correspondem para este caso, nos dados apresentados na Tab.23.

Tabela 23 – Dados para obtenção do t-Esperado/Crítico

Significância (α)	0.05
Graus de Liberdade (n-2)	10
t (Esperado)	2,23

²⁹ QuickCalcs (Desenvolvido por GraphPad Software) – Disponível em: <<https://www.graphpad.com/quickcalcs/ttest1/?Format=SD>>

Ou seja, na comparação das médias, qualquer comparação entre as médias que apresente:

Tabela 24 – Leitura do t esperado em relação a H_0

$t < 2,23$	Aceitamos H_0	$\alpha > 0.05$
$t \geq 2,23$	Rejeitamos H_0	$\alpha \leq 0.05$

Posso apresentar então, os valores de t calculados em função das médias dos pré e pós teste, assim como os valores da significância e suas interpretações. Ver Tab. 23.

Tabela 25 – Apresentação dos resultados do teste t aplicado à média dos acertos.

Local	t	p	%	Leitura	Conclusão
CEPMCS (Aplicação)	2,49	0.0319	3,19%	Rejeitamos H_0	A aplicação do experimento, contribui para o aprendizado.
CEPMCS (Controle)	1,89	0.0871	8,71%	Aceitamos H_0	A não aplicação do experimento, não contribuiu para o aprendizado.
Colégio Dínamo (Aplicação)	3,45	0.0061	0,61%	Rejeitamos H_0	A aplicação do experimento, contribui para o aprendizado.
Colégio Dínamo (Controle)	1,00	0.3374	33,74%	Aceitamos H_0	A não aplicação do experimento, não contribuiu para o aprendizado.

Isto posto, a partir das leituras e conclusões trazidas na Tabela 25, considerando que rejeitar H_0 a hipótese implícita seja apenas H_A . Posso afirmar sob estas condições, que a partir deste tratamento estatístico, a metodologia aplicada contribui para o aprendizado.

Tal conclusão, pode ser apresentada com 96,8% de confiabilidade para a aplicação no CEP MCS, e 99,4% de confiabilidade com a aplicação no Colégio Dínamo, permitindo assegurar a eficácia da proposta para contribuição da aprendizagem do tema proposto.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Tendo em vista o cenário do ensino de Física na educação básica Brasileira, e a posição do estudo da Óptica Física no currículo do ensino médio, aceitei o desafio de desenvolver uma proposta contextualizada para a superação dessas dificuldades. Foi encontrado então como alternativa em potencial, o problema do poder resolução, problema relacionado à difração quando analisado sob a ótica do critério de Rayleigh. Um problema extremamente presente no dia a dia, e além de tudo, um problema com uma contextualização direta com a Astronomia. Uma correlação que permite aproveitar um interesse em potencial dos estudantes pela Astronomia para apresentar um problema contextualizado, capaz de prender a atenção e ser utilizado para desenvolver uma aprendizagem significativa.

Sob esse cenário, foi definido o objetivo de desenvolver um roteiro experimental para o estudo do critério de difração de Rayleigh, roteiro que foi desenvolvido e é apresentado neste trabalho (Ver Apêndice 5). Um roteiro que sobretudo oferece uma montagem extremamente simples e acessível a qualquer professor que deseje utilizá-la, vide as análises de professores sobre o produto após a aplicação (Ver Apêndice 4).

Sendo capaz de oferecer resultados muito próximos aos previstos pela teoria apenas com um material acessível e de baixo custo. Que em sua aplicação rendeu bons resultados ao ser aplicada em diversos ambientes de ensino, como na educação básica, ensino superior e na pós graduação. Evidenciando sua contribuição e potencial de aplicação para o estudo do problema em diversos níveis de ensino. Como resultado da aplicação do experimento, houve uma motivação dos alunos ao redor da atividade experimental e uma participação efetiva dos estudantes em sua realização, além da contribuição significativa na aprendizagem dos estudantes.

Uma conclusão que pode ser apresentada a partir dos resultados do tratamento estatístico utilizando o teste-*t*. Que indicou por meio da comparação dos resultados da turma de controle e da turma de aplicação que a proposta contribuiu para um aumento nos níveis de aprendizagem. Um resultado que é apresentado com uma confiabilidade de 96,8% para a aplicação no CEP MCS, e 99,4% com a aplicação no Colégio Dínamo. Concretizando a proposta como um diferencial no processo de ensino e aprendizagem.

Para além da aprendizagem, a aplicação do roteiro surtiu efeitos positivos na comunidade escolar da rede pública de ensino ao detectarmos estudantes com dificuldades visuais associadas a ametropias. Resultado que foi utilizado pela direção do colégio para encaminhar alguns estudantes para exames oftálmicos mais precisos, refletindo na melhoria do desempenho escolar dos estudantes em outras disciplinas, que de um modo geral já vinham apresentando dificuldades de maneira silenciosa.

Vale destacar, que no caminho para a montagem final a proposta passou por diversos modelos, primeiramente desejava oferecer duas propostas, uma delas com a folha, como apresentado neste trabalho, e outra utilizando uma montagem com LED's, na qual seria possível variar a separação entre os LEDs e o comprimento de onda da luz. Uma proposta que chegou a ser montada em dois protótipos, um deles impresso numa impressora 3D para garantir melhor precisão possível (Ver Fig. 64).

Figura 64 – Um dos protótipos testados durante a pesquisa. Investigando a possibilidade de utilizar LEDs de diferentes comprimentos de onda no roteiro.



Nos testes realizados com as duas montagens, na folha de papel e com os LEDs, apenas a montagem com a folha apresentou resultados próximos aos valores previstos. Com os LEDs vários testes foram realizados, utilizando o olho nu e utilizando a câmera de um celular, esperávamos ainda, poder utilizar uma pequena luneta nesta proposta. Entretanto, todos testes associados a proposta com os LEDs apresentaram valores experimentais muito discrepantes dos valores previstos pela teoria. Depois de diversos testes e tentativas de adaptar a proposta, abandonamos a proposta dos LEDs avaliando que a geometria da superfície do mesmo interfere na direção dos raios emitidos, não permitindo a aproximação para grandes distâncias do ângulo θ na aproximação feita na Eq. 3.

Após este resultado, debruçado sob a primeira proposta surgiu uma a segunda alternativa, utilizar as faixas coloridas ao invés dos LEDs para avaliar a relação do comprimento de onda no critério de Rayleigh, proposta que ao ser testada apresentou resultados com um bom potencial. Apresentando valores do critério proporcionais ao comprimento de onda, como sugerido pela teoria. Contudo, o refinamento desta proposta carecia de um maior número de aplicações.

O momento vivido nesta etapa do trabalho, foi um momento de isolamento social por conta da pandemia de COVID-19, o que obrigou a adaptação da proposta para a realização de mais testes da alternativa com as folhas coloridas. Que foi realizada por meio da apresentação do trabalho de maneira remota para que estudantes da 7ª Turma do MPASTRO pudessem fazer a aplicação do roteiro em suas

casas com os materiais disponíveis. Contudo, o resultado dessas aplicações, obtido por meio de um formulário online, não é capaz de revelar nenhum indício de correlação entre o comprimento de onda e o critério de Rayleigh. Não nos permitindo concluir que a proposta com cores nas folhas de papel possa ser utilizada de forma assertiva. Mostrando-se satisfatória apenas na aplicação preliminar e carecendo de mais testes, uma vez que diversas variáveis podem ter influência nos resultados obtidos pelos colegas. Onde as condições de aplicação nas residências de cada um podem ter variado significativamente, e comprometido o resultado obtido por cada um deles.

De forma geral, tendo como parâmetro, os objetivos iniciais do trabalho, a proposta experimental apresentada é capaz de determinar com uma precisão razoável, dentro da simplicidade do experimento e das aproximações feitas, o valor do critério de Rayleigh. Assim como prever as distâncias máximas nas quais é possível resolver a separação entre duas fontes. Além do êxito na determinação do valor do critério de Rayleigh pela proposta, é evidente a contribuição da proposta no processo ensino-aprendizagem no contexto da Ondulatória/Óptica Física, afirmação que é feita a partir dos resultados do teste-t sob as médias de acertos no pré e pós-teste. O que permite concluir, oferecendo essa proposta como um material acessível, motivador e contextualizado para o ensino da Física e Astronomia nos diversos níveis de ensino.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE K; SANTOS J; FERREIRA G; **Os Três Momentos Pedagógicos como metodologia para o ensino de Óptica no Ensino Médio: o que é necessário para enxergarmos?** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.32, n.2, p.461-482, 2015.

ALVES C. M. **Teste t de Student.** Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Seção Técnica de Informática; Piracicaba 2017.

ARRIGONE G.; MUTTI C.; **Uso das Experiências de Cátedra no Ensino de Física.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v. 28, n. 1: p. 60-60 90, abr. 2011

BERNARDES O.; BARBOSA R.; IACHEL G.; NETO A.; PINHEIRO M.; SCALVI R; **Abordando o ensino de óptica através da construção de telescópios.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 3, p. 391-396, 2006.

BERNARDO, L. M. **Concepções sobre a natureza da luz no século XVIII em Portugal.** Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência, n. 19, p. 3-12, 1998.

BASSALO J.; **A Crônica da Óptica Clássica.** Caderno Catarinense de Ensino de Física. Florianópolis, 4(3): 140-150, dez. 1987.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio).** Ministério da Educação. Brasília, 2000.

BRASIL. **Orientações Curriculares Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais Física (Ensino Médio).** Ministério da Educação. Brasília, 2002

BRASIL. **Base Nacional Curricular Comum.** Ministério da Educação. Brasília. 2017

BRASIL. **Estudo exploratório sobre o professor brasileiro, com base nos resultados do Censo Escolar da Educação Básica 2007.** Brasília: Inep, 2009. 63 p.
Disponível em:
<http://www.inep.gov.br/download/censo/2009/Estudo_Professor_1.pdf>

BRAUM L. M; BRAUM T. **A Montagem de Young no Estudo da Interferência, Difração e Coerência de Fontes Luminosas.** Caderno Catarinense de Ensino de Física., v.11,n.3: p.184-195, dez.1994

CATELLI F.; GIOVANNINI O.; **Espectrômetro amador: quantificando comprimentos de onda.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 34, n. 3, p. 951-970, dez. 2017.

CATELLI, F.; REIS, C. **Demonstre em aula: imagens dentro de lâmpadas.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 21, n. 1, p. 115-119, Abril, 2004.

CATELLI, F.; FRANCO, V. **Pense e responda! Imagens queimam?** Caderno Brasileiro de Ensino de Física., v. 23, n. 3, p. 439-443, Dezembro, 2006.

CATELLI, F.; VICENZI, S. **Óptica geométrica no café da manhã.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 21, n. 3, p. 392-400, Dezembro, 2004.

CATELLI, F.; VICENZI, S. **Laboratório Caseiro: Interferômetro de Michelson.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 18, n. 1, p.108-116, 2001.

CATELLI F. E LAZZARI F., **Interferência da Luz: Uma Versão Simplificada do Espelho de Lloyd.** Física na Escola 5(1), 20 (2004).

CANALLE J. & SOUZA A. **Simplificando a Luneta com Lente de Óculos.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 22, n. 1: p. 121-130 abr. 2005 121.

CALÇADA, C. SAMPAIO, J. **Física Clássica: Ondas.** 2ª. Edição. 2ª. Reimpressão. Atual Editora. São Paulo. 1998.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. **Ouvindo um controle remoto!!!** Disp. em:<fisicamodernaexperimental.blogspot.com.br/search/label/Radio%20Laser>.

CARLIN N.; SZANTO E.; SEALE I.; JORGE F.; SOUZA F.; BECHTOLD I.; GASQUES L.; **Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar** Revista Brasileira de Ensino de Física 27, 349 (2005)

COELHO, G. **O Entendimento dos Estudantes Sobre a Natureza da Luz em um Currículo Recursivo.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.27, n.1:p. 63-87, 2010.

COSTA I. **Pense e responda! Qual o comprimento e a profundidade de bits em cd, dvd e bd?** Caderno Brasileiro de Ensino de Física 24, 333 (2007).

DAMASCENO, J. **O Ensino de Astronomia como Facilitador nos Processos de Ensino e Aprendizagem.** Dissertação de Mestrado. MNPEF, FURG, Rio Grande. 2016.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**. Ed. Campus, 1983.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

HWANG F., **Computer Program OPTICAL RESOLUTION MODEL** (2008), <<https://www.compadre.org/Repository/document/ServeFile.cfm?ID=8198&DocID=866>>.

FERREIRA C. J & PATINO. M. C.; **O que realmente significa o valor-p?** *Jornal Brasileiro de Pneumologia*. 2015;41(5):485-485. 2015

FILHO A.; **Uma Representação do Fenômeno de Interferência de Ondas Utilizando Lâminas Transparentes e Retroprojektor**. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física.*, v.21, n. especial: p. 297-302. 2004.

FILHO, A. **USO DE TELESCÓPIOS REMOTOS NO ENSINO DA ASTRONOMIA: da interface na Web à aplicação no estudo do Catálogo Messier e da Lua**. 2017. Dissertação (MPASTRO) - UEFS, Feira de Sanatana, 2017.

FRANCIS A.; HARVEY E; **Fundamentals of Optics**, 4th Ed.

FUKE, F. YAMAMOTO, K. **Os Alicerces da Física 2**. São Paulo: Saraiva, 2010. Vol. 2.

KRAPAS S.; SANTOS P.; **Modelagem do Espalhamento Rayleigh da Luz com Propósitos de Ensino e de Aprendizagem**. *Cad. Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n.3: p.341-350, dez. 2002.

KALINOWSKI H., DUMMER O. E GIFFHORN, E. **Produção de redes de difração por técnica fotográfica no ensino médio**. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* 18, 248 (2001).

LABURÚ, C.; SILVA, H. **Invisibilidade da garrafa (a explicação correta)**. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 21, n. 1, p. 111-114, Abril, 2004.

LABURÚ C.; SIMÕES A.; URBANO A.; **Mexendo com Polaroides e Mostradores de Cristais Líquidos (O Ensino da Física Contemporânea, Tendo como Pano de**

Fundo a Física do Cotidiano) Caderno Catarinense de Ensino de Física 15, 192. 1998.

LABURÚ C. & LOPES E., **Diâmetro de um fio de cabelo por difração (um experimento simples)**. Caderno Catarinense de Ensino de Física 18, 240 (2001).

LIANG, J., & WESTHEIMER, G. **Method for measuring visual resolution at the retinal level**. Journal of the Optical Society of America, A10, 1691–1696. 1993

LOUREIRO J. M. & GAMEIRO M. G. **Interpretação crítica dos resultados estatísticos: para lá da significância estatística**. Revista de Enfermagem Referência. III Série - n.º 3 - Mar. 2011

MEILANY F.; GARAVAGLIAZ M.; **Rayleigh Resolution Criterion for Light Sources of Dierent Spectral Composition**. Brazilian Journal of Physics, vol. 27, no. 4, 1997.

MENDONÇA R.; MISOGUTI L.; MUNIZ R.; TUBOY M.; BAGNATO V.; **Demonstrações de reflexão total interna para alunos do segundo grau**. Revista Brasileira de Ensino de Física 20, 296 (1998).

MOURA B.; **Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 111-141, abr. 2016.

MULLER M. PAULINO R. FABRIS J. **Estudo Experimental do Critério de Rayleigh**. 214 Revista Brasileira de Ensino de Física vol. 20, no. 3, Setembro, 1998

OPENSTAX. **Limits of Resolution: The Rayleigh Criterion**. OpenStax-CNX module: m42517, 2013.

GALLI C. SALAMI M. **Laboratório caseiro: registro de figuras de difração da luz em papel fotográfico**. Caderno Catarinense de Ensino de Física., v. 16, n. 2: p. 242-245, ago. 1999.

GIRCOREANO J.; PACCA J.; **O Ensino da Óptica na Perspectiva de Compreender a Luz e a Visão**. Caderno Catarinense.de Ensino de Física, v.18, n.1: p.26-40, abr. 2001

GUEDES A.; BRAUN L.; Rizzati M.; **Visualização da Miopia, da Hipermetropia e do Astigmatismo Através do Simulador Didático do Globo Ocular**. Revista Brasileira de Ensino de Física 22, 137 (2000)

HECKLER V.; SARAIVA M.; FILHO K.; **Uso de simuladores, imagens e animações como ferramentas auxiliares no ensino/aprendizagem de óptica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 2, p. 267-273, 2007.

PIMENTEL, J. **Demonstre em aula. Lentes biconvexas convergentes e divergentes**.

Caderno Catarinense de Ensino de Física., v. 16, n. 3, p. 349-352, Dezembro, 1999.

PRIANTE N.; RINALDI C.; **Laboratório Didático de Física como Produção Científica**. Caderno Catarinense de Ensino de Física., v.13,n.2: p.121-138, ago.1996.

RAYLEIGH. **Investigations in optics with special reference to the spectroscope. Resolving, or separating power of optical instruments**. Philosophical Magazine, 8, 261–274, Reprinted in. Scientific Papers of Lord Rayleigh (Vol. I). New York: Dover, p. 420. 1879

RAMALHO, NICOLAU, TOLEDO, **Fundamentos da Física 2**. Editora Moderna, 11ª Edição. São Paulo, 2015

RIBEIRO J.; VERDEAUX M.; **Atividades Experimentais no Ensino de Óptica: Uma Revisão**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 4, 4403. 2012

SHANNON R., WYANT J. **Applied Optics and Optical Engineering**. Volume 9. (1983)

RODRIGUES I. **Óptica Adaptativa em Astronomia**. Tese de Doutorado. Univap. São José dos Campos - SP, Brasil.1999

SABA M. & EPIPHANIO I.; **Abrindo o olho – Dissecando um olho de boi para entender a óptica do olho humano**. Física na Escola 2(2), 16 (2001)

SANTOS, A. **Ensino de conceitos geométricos e astronômicos contextualizado na obra “planolândia: um romance de muitas dimensões”**. 2019. Dissertação (MPASTRO) - UEFS, Feira de Santana, 2019.

SANTANA B. E CRUZ F. **Determinação do índice de refração de uma placa de acrílico. Uma proposta para o ensino médio.** Física na Escola 9(1), 40 (2008).

SILVA, E; MURAMATSU, M. **O fenômeno do speckle como introdução à metrologia óptica no laboratório didático.** Revista Brasileira Ensino Física., São Paulo, v. 29, n. 2, p. 283-286, 2007.

SILVA, E; MURAMATSU, M. **Medindo refração de líquidos usando difração da luz.** Física na Escola, v. 8, n. 1, 2007

SILVEIRA F. E AXT R. **O que vemos quando projetamos a luz do Sol com um espelho plano: manchas luminosas ou imagens?** Caderno Brasileiro de Ensino de Física 24, 353 (2001).

SIEMSEN G. G & LORENZETTI L. A **Pesquisa em Ensino de Astronomia para o Ensino Médio.** ACTIO, Curitiba, v. 2, n. 3, p. 185-207, out./dez. 2017.

SILVA, R. **A mediação pedagógica no desenvolvimento de uma sequência de ensino investigativa que articula conhecimentos astronômicos e físicos.** 2019. Dissertação (MNPEF) - UFES, Vitória, 2019.

SILVA, F;. **A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 1, p. 149-159. 2007

SILVA A.; ALMEIRA M.; **Física Quântica no Ensino Médio: O que dizem as Pesquisas.** Cad. Bras. Ens. Fís., v. 28, n. 624 3: p. 624-652, dez. 2011.

SILVA O.; ALMEIDA A.; ZAPPAROLI F.; ARRUDA S.; **Convergência e Divergência de Raios de Luz Por Lentes e Espelhos: Um Equipamento para Ambientes Planejados de Educação Informal.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 30, n. 2: p. 427-439, ago. 2013.

TOSSATO, G. **A função do olho humano na óptica do final do século XVI.** Scientiae Studia. São Paulo, v. 3, n. 3, p.415-441. 2005.

TORALDO G. **Resolving power and information.** Journal of the Optical Society of America, 45, 497–501. 1955

THIRUPATHI P.; RAMAKRISHNA T.; **Two-Point Resolution capabilities for an optical system with parabolic filters as functions of the degree of coherence of**

illumination. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 4, April. 2014

URROME P. HINRICHS R. **College Physics.** OpenStax, 2012.

VASCONCELOS, T. T. **O uso da astronomia com auxílio de tecnologias e dinâmicas para o ensino da física.** 2018. 140 f. Dissertação (MNPEF) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

VICENZI S.; **Difração e Interferência para Professores do Ensino Médio.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007

VIDIGAL, W. **Elaboração e Aplicação de Atividades Investigativas na Formação Inicial de Professores da Educação Básica em Astronomia.** 2019. Dissertação (MNPEF) - UFES, Vitória, 2019.

VIEIRA, D. **Ensino de astronomia mediado pela literatura: uma análise da tertúlia literária dialógica e outras fontes de leitura.** 2019. Dissertação (MPASTRO) - UEFS, Feira de Santana, 2019.

VILLANI, C. E. P. **As práticas discursivas argumentativas de alunos no Ensino médio no laboratório didático de Física.** Belo Horizonte Faculdade de Educação da UFMG, 2002.

WOLFGANG R.; COSTAS P.; **How to beat the Rayleigh resolution limit: A lecture demonstration.** American Journal of Physics, 2002

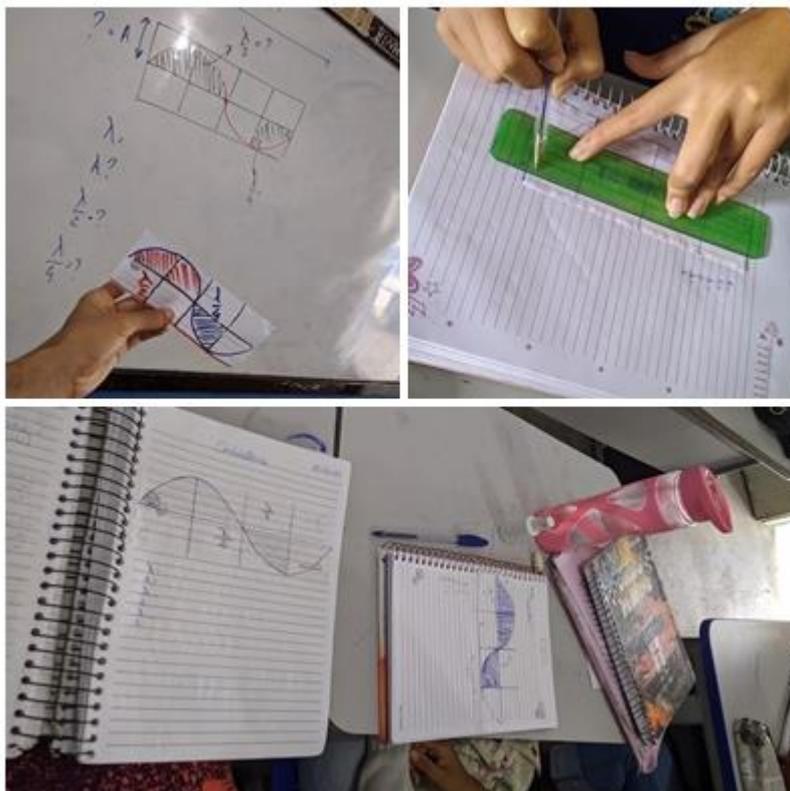
XAVIER A.; **Máscara Espectrográfica para Registro Digital de Espectros de Fontes Brilhantes.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.34, n.2, p.621-635, 2017.

APÊNDICE 1

PRÁTICAS EXITOSAS UTILIZADAS NA SEQUÊNCIA DE AULAS ANTERIORES À APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO

Aula 1: foi feito por cada aluno o estudo dos elementos de uma onda, utilizando para isso uma curva senoidal. Construída utilizando uma folha de caderno dividida em 4 partes, na qual eles tiveram que medir, com ajuda de uma régua, o comprimento de onda e a amplitude.

Figura 1.1 – Fotos da Aula 1 sendo realizada no Colégio Estadual Professora Maria do Carmo Santana (CEPMCS)



Aula 2: Utilizei um segmento de “mola helicoidal” utilizada para encadernação em papelarias com a intenção de gerar ondas transversais e ondas longitudinais (Ver Fig. 1.2). Permitindo também que os alunos reconheçam os elementos de onda na onda estacionária gerada na mola.

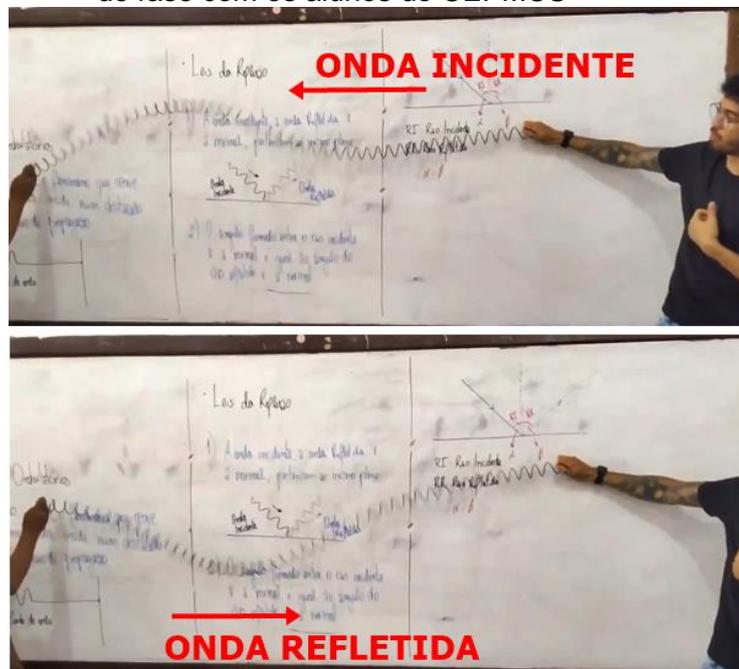
Figura 1.2 – Realização do experimento com espiral de caderno, gerando uma onda transversal no CEPMCS.



Ainda na aula 2. Foi de grande proveito a apresentação do espectro eletromagnético tendo como motivação a análise dos mitos e noções presentes no senso comum envolvendo o uso do forno de micro-ondas, assim como as radiações na faixa de Ultravioleta, Rádio, Infravermelho e Raios-X.

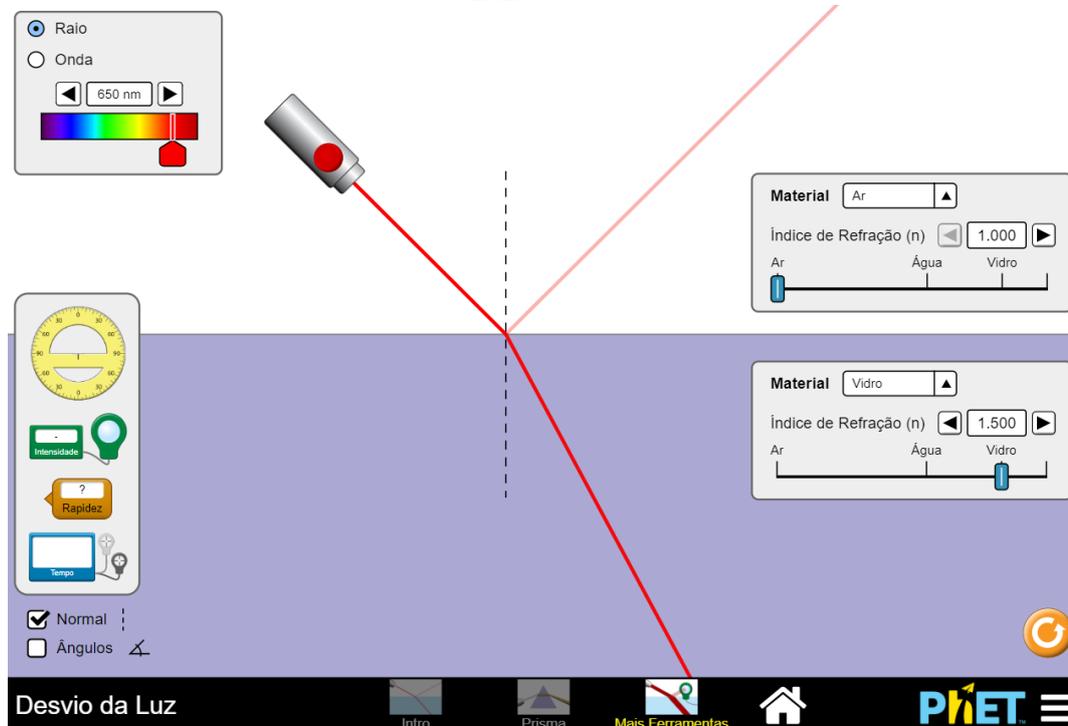
Aula 3: No estudo das leis da reflexão, durante o momento do estudo da reflexão de ondas em cordas, fizemos a introdução do conceito de fase da onda, no momento em que os alunos percebiam que na reflexão na corda com extremidade fixa a onda tinha sua fase invertida,

Figura 1.3 – Realização da aula. Reflexão de uma onda na mola/corda. Análise do conceito de fase com os alunos do CEPMCS



Aula 4: Estudando sobre o fenômeno da refração, utilizamos uma simulação da plataforma PhET (Desvio da Luz²⁹). Na qual podemos explorar a relação do ângulo de incidência com o ângulo de refração, fazer o cálculo do índice de refração dos meios, além de explorar a condição de reflexão total na transmissão entre meios com diferentes refingências.

Figura 1.4 – Simulação “Desvio da Luz” do PhET ³⁰utilizada para o estudo da refração da Luz.

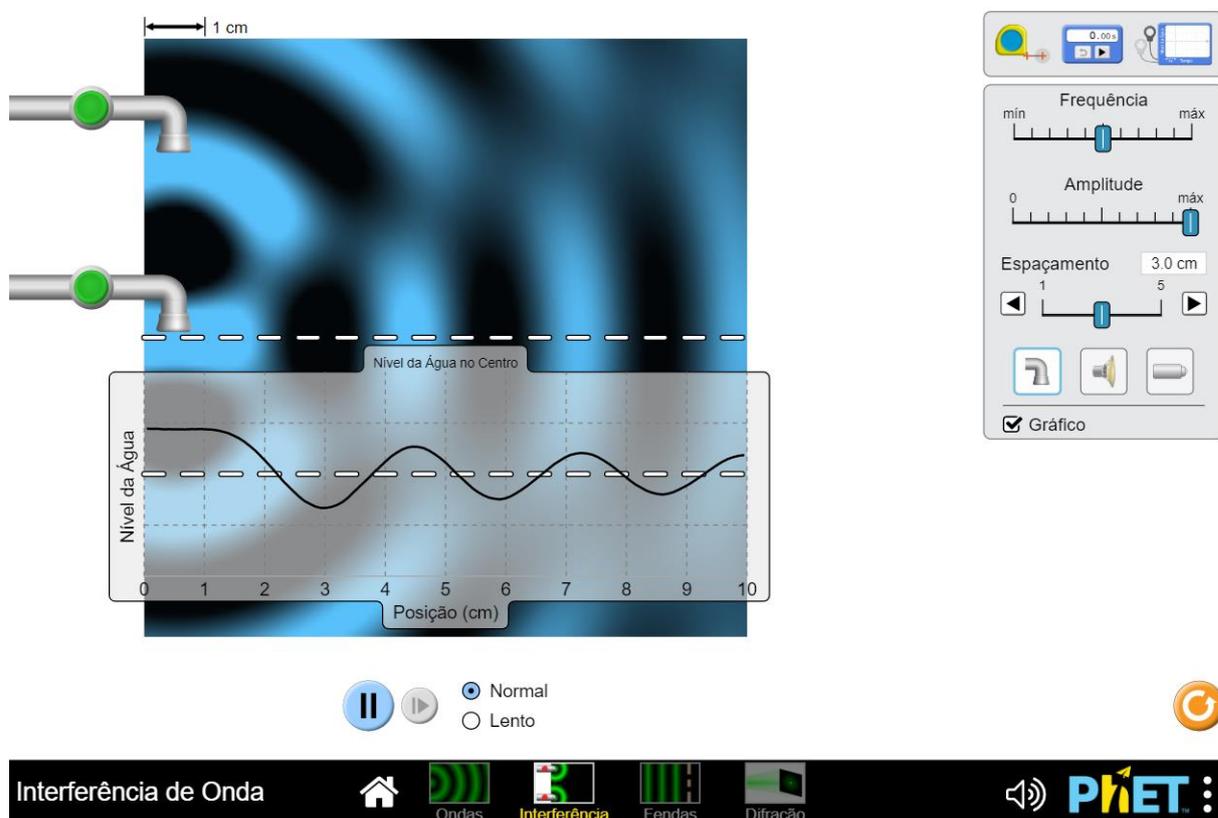


Fonte: PhET – Interactive Simulations²⁹

Aula 5: E para o último conteúdo anterior à difração, a interferência, utilizamos mais uma simulação do PhET, desta vez, uma simulação que nos permite ilustrar a interferência de ondas numa cuba d’água, ondas sonoras ou ainda entre lasers.

³⁰ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/bending-light>

Figura 1.5 - Simulação “Interferência” do PhET utilizada para o estudo do fenômeno da interferência entre ondas mecânicas e eletromagnéticas.



Fonte: PhET – Interactive Simulations³¹

³¹ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_pt_BR.html>

APÊNDICE 2

GUIA DE MONTAGEM DO ARRANJO EXPERIMENTAL UTILIZADO NA PROPOSTA.



Como citado, a montagem do conjunto, uma vez que temos os materiais, é simples. Mas vale apresentar descrição de como foi feita a montagem, com o intuito de evitar dificuldades, ou ainda para haver uma unidade metodológica para o leitor que desejar montá-lo.

Passo a Passo da Montagem

Para a montagem do arranjo utilizado no roteiro, você deverá ter em mãos os seguintes itens:

- a. Folha impressa, com o padrão de linhas³².
- b. Prancheta para fixação da folha
- c. Tripé/Base de fixação do conjunto
- d. Porca e Parafuso.
- e. Tubo de PVC

³² Assegure que a separação entre as linhas é de 2mm na impressão. Padrões para download e impressão disponíveis no endereço
<https://drive.google.com/drive/folders/12Dk_hyYJmkcxsoR7gcQx-H3NO8HfzhD1?usp=sharing>

Dispondo destes itens, você deverá (Ver Fig. 2.1):

1. Com a ajuda de uma furadeira, faça um furo no tubo (e). Este furo deve ter um diâmetro que permita a passagem do parafuso (d) utilizado.
2. Atravesse o parafuso pelo furo feito, e fixe a prancheta (b) com o uso da porca.
3. Fixe o tubo no tripé (c)
4. Prenda a folha (a) à prancheta (b)

Figura 2.1 – Passo a passo da montagem do experimento.



Possíveis Adaptações

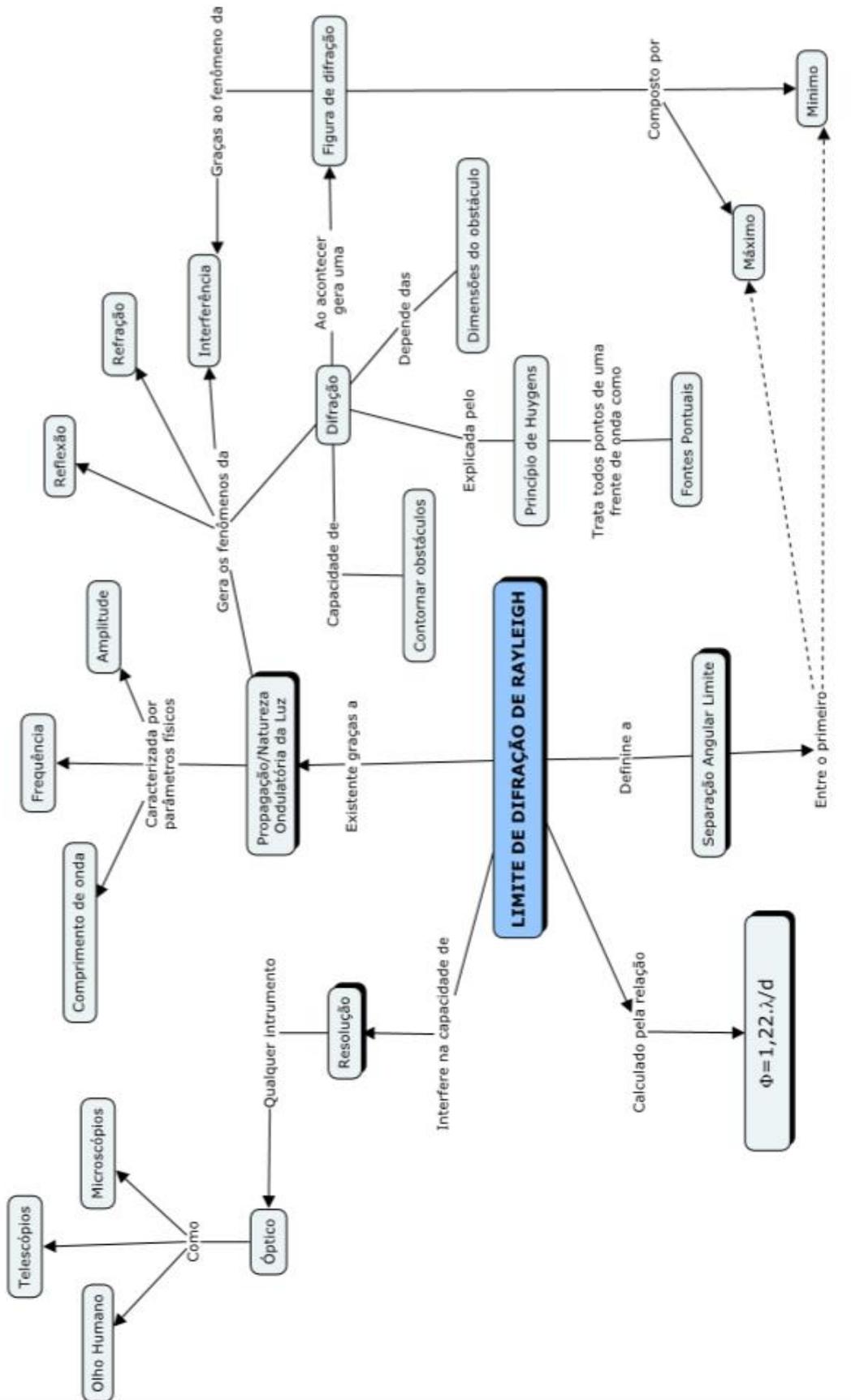
Para a montagem do conjunto, utilizei materiais que dispunha de fácil acesso para mim. Contudo, você pode encontrar dificuldades ao tentar reproduzir da mesma forma como fiz a montagem, então, deixo algumas sugestões de possíveis substituições nos materiais utilizados.

Item c. – Tripé: Na montagem do experimento, utilizei como suporte do conjunto, um tripé de telescópio. É possível que você não tenha a disposição um tripé deste tipo, deste modo, a substituição pode ser feita de maneira simples: Utilize um tubo com tamanho maior do que o de 50cm utilizado neste roteiro. De preferência, por volta de 1,8m.

Item e. – Tubo de PVC: Na aplicação feita, a altura da prancheta podia ser regulada por meio dos ajustes de altura do próprio tripé. Contudo, caso opte por usar somente um cano de PVC como suporte, recomendo que faça furos em diversas alturas do tubo. De modo que possa ajustar a altura da prancheta de acordo com o observador, uma vez que esta deve estar na linha dos olhos do mesmo.

APÊNDICE 3

MAPA CONCEITUAL PARA APRESENTAÇÃO DO CRITÉRIO DE RAYLEIGH



APÊNDICE 4

PARECER DOS MESTRANDOS DA 7ª TURMA DO MPASTRO SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL

Foi solicitado aos mestrados da 7ª turma após aplicarem a proposta experimental, que deixassem num dos campos do formulário online, um parecer acerca do roteiro utilizado. Um feedback bastante significativo, por se tratar de pareceres escritos por professores em sua maioria do Nível Médio, que possuem experiência de sala de aula para avaliar a efetividade da proposta dentro de suas condições de aplicação e realidade escolar, principalmente, no que diz respeito à viabilidade de aplicação na Rede Pública de Ensino, que muitas vezes, carece de recursos.

Após considerar as avaliações, algumas correções foram feitas e algumas sugestões inseridas no produto, outras considerações sobre os pareceres, também são trazidas na secção de conclusão do trabalho.

A seguir, são transcritos *ipsis litteris* os pareceres deixados pelos professores no formulário online:

Professor 1: *“Sugiro realizar em conjunto com uma observação a um sistema duplo como alfa Centauri, que já serviu de exemplo no roteiro”.*

Professor 2: *“Existe um contexto teórico do conteúdo do roteiro bem como as equações que devem ser utilizadas para resoluções das análises dos resultados. Os materiais são de fácil acesso, porém, se for estudante de escola pública, deve verificar a disponibilidade de imprimir as imagens coloridas. Seria interessante neste caso, fazer na instituição com mediação do professor a ajuda dos colegas. Em relação a análise dos resultados, encontrar os valores de R (m), o diâmetro da pupila (usando a notação científica para transformação de unidades para o Ensino Fundamental II e Médio é interessante também). Nas primeiras tentativas, senti dificuldades, mas com a sua ajuda e dos colegas da Física, foi possível a resolução das questões. No geral, o roteiro está de acordo com a apresentação e conteúdo desenvolvido pelo professor da disciplina do curso. Obrigada por mais uma oportunidade de crescimento!!!”.*

Professor 3: *“O roteiro é bom, objetivo e cumpre sua função. Contudo creio que a linguagem tem que ser mais objetiva e menos rebuscada em certos momentos. O conteúdo apresentado também denota que os estudantes já possuem um conhecimento prévio do conteúdo, pois alguns conceitos são deixados de lado no momento em que são apresentados. Temos sempre que nos preocupar com quem vai ler e o material. O mesmo não é voltado exclusivamente para acadêmicos e sim para estudantes do ensino médio.*

No geral, muito bom. Eu usaria em sala de aula!”.

Professor 4: *“Roteiro está claro como aplicar.”.*

Professor 5: *“A atividade é legal de ser feita, o roteiro está autoexplicativo, só acrescentaria a sugestão de realizar o experimento em equipe para deixar o trabalho mais fluído.”.*

Professor 6: *“Muito simples de realizar, o problema é com o espaço para realização do experimento.”.*

Professor 7: *“Acerca do experimento, em si, não me arriscarei fazer avaliação alguma, haja vista não possuir conhecimento técnico profissional para tanto. Contudo entendi perfeitamente o objetivo pretendido. Contudo, com o devido respeito, nobre colega, visualizei diversos erros de português no roteiro proposto. Sugiro que reveja o mesmo em busca de sanar tal problema.*

E na pergunta sobre a pupila, o sistema não aceita que se coloque 0,003 m. Só aceita 3, mas aí subentende ser 3m quando na verdade são 3 milímetros.”.

Professor 8: *“O roteiro apresenta um experimento bastante interessante, e que, com certeza, gera entusiasmo na sua execução”.*

Como sugestão gostaria de sugerir que na tabela 3 fosse inserido uma linha onde possa ser escrito o comprimento de onda para as diferentes cores.

Na parte de materiais necessários que fosse inserido "celular e/ou computador", no meu caso utilizei os dois para realizar o registro e medição da pupila.

E, outra sugestão, é inserir figuras dos objetos astronômicos descritos nas questões 3 e 4 das atividades.

No mais, a atividade está muito bem desenvolvida, e merece todos os elogios. Espero que possa ser disponibilizada em forma de produto para que possamos reproduzi-la nas salas de aula.

Parabéns!.

Professor 9: "*Pupila é 0,03mm*".

Professor 10: "*Experimento interessante de ser realizado, de fácil aplicação e entendimento.*".

APÊNDICE 5

PRODUTO EDUCACIONAL

ROTEIRO EXPERIMENTAL PARA ENSINO DA DIFRAÇÃO

Produto final obtido da dissertação de mestrado com o título – Proposta de Atividade Experimental para Determinação do Critério de Resolução de Rayleigh, apresentado ao programa de mestrado profissional em ensino de Astronomia da UEFS, sob a orientação do prof. Dr. Marildo G. Pereira.

ROTEIRO EXPERIMENTAL PARA ENSINO DA DIFRAÇÃO

Braian Barbosa de Oliveira

Professor da Rede Estadual de Ensino da Bahia
braiandeoliveira@gmail.com

Produto educacional da dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós Graduação em Ensino de Astronomia da UEFS, desenvolvido sob a orientação do Prof. Dr. Marildo G. Pereira.

Pós-Graduação em **Astronomia**
MESTRADO PROFISSIONAL
UEFS



UEFS
UNIVERSIDADE ESTADUAL
DE FEIRA DE SANTANA

Apresentação

Prezado (a) Professor (a), este trabalho constitui o Produto Educacional obtido como resultado da dissertação de mestrado intitulada "Critério de Resolução de Rayleigh: Proposta de Atividade Experimental para o Ensino da Difração", desenvolvida no Programa do Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana – MPASTRO (UEFS). Um trabalho motivado pela percepção da baixa presença do estudo da difração no currículo da educação básica. E tendo como raiz trabalhos que sugerem o uso de elementos da Astronomia e da experimentação como agentes motivadores no ensino da Física. Propondo assim a utilização do problema do poder de resolução, sobre a perspectiva do critério de difração de Rayleigh e contextualizado à Astronomia como alternativa para contribuir no ensino da difração.

Na educação básica, o estudo da Óptica é apresentado subdividido em Óptica Geométrica e Óptica Física. A Óptica Geométrica parte de uma concepção corpuscular, estudando a luz a partir de princípios, como o de reversibilidade da propagação retilínea e da independência dos raios luminosos. Esse tratamento tem suas limitações, e pode pôr suas concepções em cheque. Por exemplo ao se questionar sob a seguinte situação – "Se a luz se propaga de forma retilínea, porque ao passar um feixe luminoso de raios paralelos por uma fenda, a luz parece se dispersar, perdendo seu paralelismo inicial?" –

O tratamento puramente geométrico não dá conta de responder esse questionamento, uma vez que, regiões onde deveria existir apenas sombra, são preenchidas por alguns raios luminosos. Neste momento, a óptica geométrica, exaustivamente explorada no ensino médio, dá lugar à óptica física, mais especificamente ao fenômeno da difração. Contudo, embora se trate de um fenômeno extremamente comum, e crucial para a compreensão de diversas situações no cotidiano, a difração não é tão valorizada nos currículos escolares, sendo muitas vezes completamente negligenciada.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo de contribuir para a mudança desse cenário, oferecendo uma proposta de experimento sobre o problema do poder de resolução de dispositivos ópticos. Um problema que além de ser extremamente presente no cotidiano, mantém uma relação com o fenômeno da difração. Fenômeno que por sua vez, é fundamental para a compreensão da relação que expressa o fator que limitante da capacidade de resolver a separação entre dois objetos, como os caracteres num teste de acuidade visual na tabela ou optótipo de Snellen (Ver Fig. 1).

Figura 1 - Tabela ou Optótipo de Snellen, diagrama utilizado em testes de acuidade visual.

20/200	E	1
20/100	F P	2
20/70	T O Z	3
20/50	L P E D	4
20/40	P E C F D	5
20/30	E D F C Z P	6
20/25	F E L O P Z D	7
20/20	D E F P O T E C F	8
20/15	L E F O D P C T P	9

Fonte: ISEE - International Society for the Enhancement of Eyesight (2019).

Tendo como expectativa que ao oferecer uma alternativa simples e de baixo custo aos professores de Física do ensino médio e superior, para contextualização da difração através de uma atividade interativa que envolve o conceito da difração, estaremos contribuindo para o contexto do ensino e Física e Astronomia. Pois os resultados da dissertação que culminou neste produto indicaram quantitativamente através de análise estatística que a prática utilizada para o ensino da difração contribuiu para o aumento da aprendizagem.

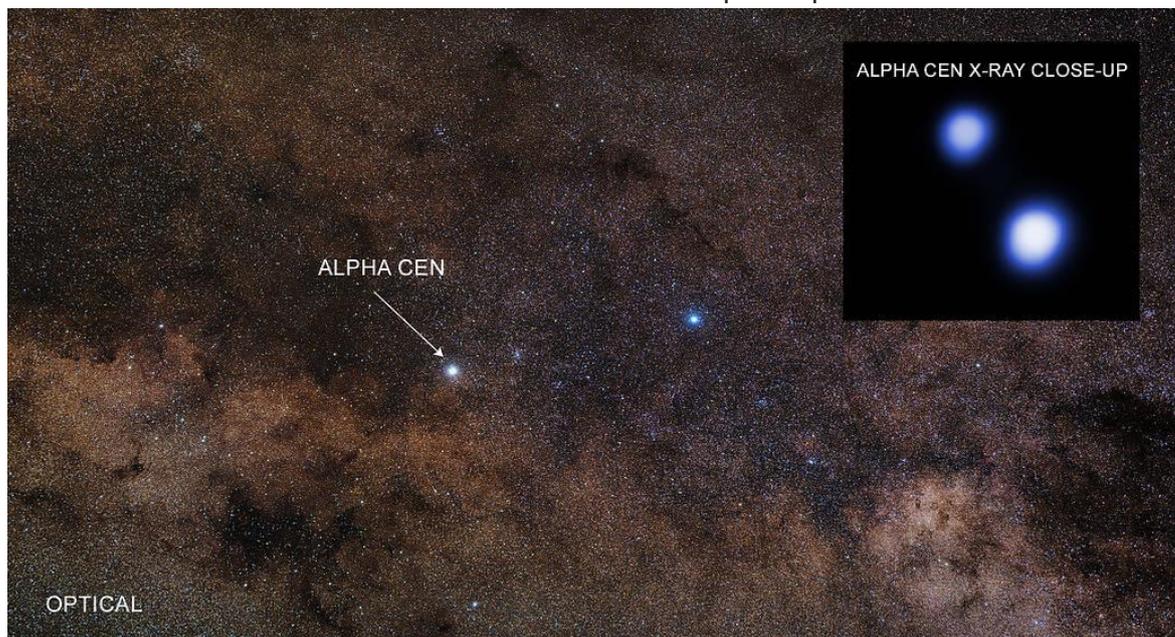
O roteiro a seguir apresentou resultados quando realizado pelo professor da disciplina mediando o processo de ensino-aprendizagem através de contextualizações antes e durante a realização do experimento. Para contribuir com a construção de tais conhecimentos, é apresentado no roteiro, uma introdução teórica ao problema do poder de resolução e critério de Rayleigh. A literatura utilizada como embasamento para o trabalho, também pode ser útil a você professor no momento de estudo sobre o tema.

Introdução

Nossa percepção do mundo é fundamentalmente baseada em nossos sentidos, não obstante somos traídos por eles, pelo simples motivo de termos um limite de percepção em cada um. Uma situação simples do cotidiano pode nos dar um claro exemplo disto, como por exemplo, a observação de um veículo à distância numa autoestrada pouco iluminada. Ao enxergarmos um único ponto luminoso, oriundo de um veículo, afirmaríamos categoricamente que se trata de uma motocicleta.

Entretanto, já faz parte do “senso comum” e da experiência empírica da população, que a veracidade desta afirmação depende da nossa distância ao veículo. Tal situação é tão abrangente, que influencia situações que vão desde a visualização de bactérias em um microscópio, testes de acuidade visual, ou até a observação de estrelas binárias visuais com um telescópio. A exemplo de Alfa Centauro, que quando vista a olho nu, se apresenta visível como um único objeto, ao passo que ao observá-la utilizando um telescópio de pequeno porte ou binóculo com abertura de pelo menos 5cm, é observado como um sistema duplo, ver Fig. 2.

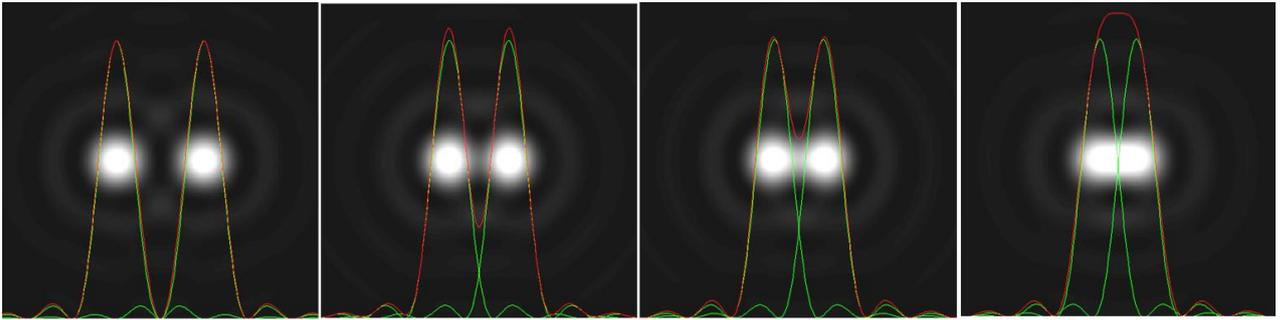
Figura 2 – α Cen e sua mais próxima companheira. Observada como uma única estrela a olho nu, e como um sistema binário num telescópio de pelo menos 5cm.



Fonte: NASA – Chandra Images (2018)

Diante de problemas, tais quais estes apresentados, foi que em 1879, J. W. Strutt III, Lord Rayleigh, propôs que o fator limitante da resolução de um instrumento óptico, em função da separação angular das fontes, seria a posição na qual o primeiro mínimo de difração da luz de um objeto coincide com o máximo central do padrão de difração do outro objeto. Quando essa separação fosse alcançada, a imagem dos objetos estaria no limite de resolução, na qual nós perdemos a capacidade de resolver individualmente as fontes, definindo assim o critério de resolução de Rayleigh (MÜLLER et. al, 1998). Para ilustrar isto, A Fig. 3. mostra a perda de resolução entre dois objetos, sobreposta aos padrões de difração quando reduzimos a separação angular.

Figura 3 - Ilustração da perda de resolução quando reduzida a separação angular das fontes, sobreposta aos padrões de difração



Fonte: *Applet Optical Resolution Model* (HWANG, 2008)

O poder de resolução é um critério arbitrário, definido através do Critério de Rayleigh, determinado através de uma relação empírica de proporcionalidade entre o comprimento de onda da luz incidente λ e o diâmetro do orifício d por onde entra a luz, através da relação (WOLFGANG & COSTAS, 2002).

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

Considerando a separação entre as fontes como x , e a distância do observador aos objetos como R é possível geometricamente reescrever, para grandes distâncias, o menor ângulo de separação descrito na Eq. 1 na forma (URROME & HINRICHS, 2012 p.1084).

$$\theta = \frac{x}{R} \quad (2)$$

Desta forma, a Eq. 2 nos permite relacionar, de maneira quantitativa, a distância do observador e a separação das fontes com o ângulo mínimo no qual é possível resolver os objetos. Por fim, deve-se ainda atentar, que o Critério de Rayleigh não se trata de uma lei, tendo em vista, que ele é obtido a partir de uma definição arbitrária (SHANNON & WYANT, 1983 p.126).



Materiais e Metodologia

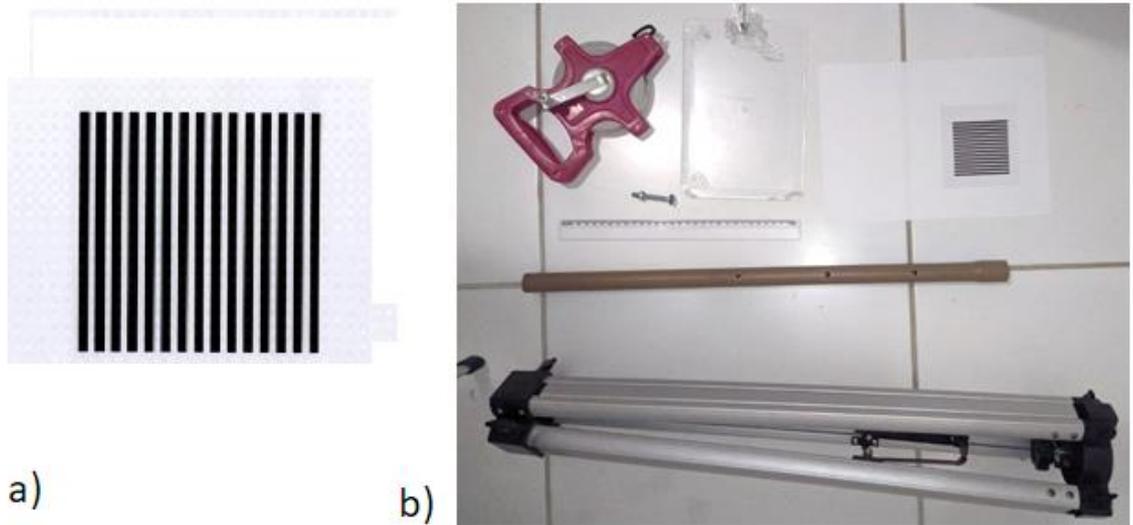
1 - MATERIAIS NECESSÁRIOS

Para contextualização do problema do poder de resolução, foi elaborada uma proposta simples, com materiais de fácil acesso e de simples montagem e aplicação, que utiliza os seguintes materiais:

1. Folha impressa com o padrão de linhas³³. Ver Fig.40a.
2. Prancheta para fixação da folha.
3. Régua de Material Translúcido/Transparente.
4. Trena (30m).
5. Tripé/Base de fixação do conjunto.
6. Porca e Parafuso para fixação da prancheta.
7. Tubo de PVC.
8. Smartphone com câmera para registro do diâmetro da pupila.

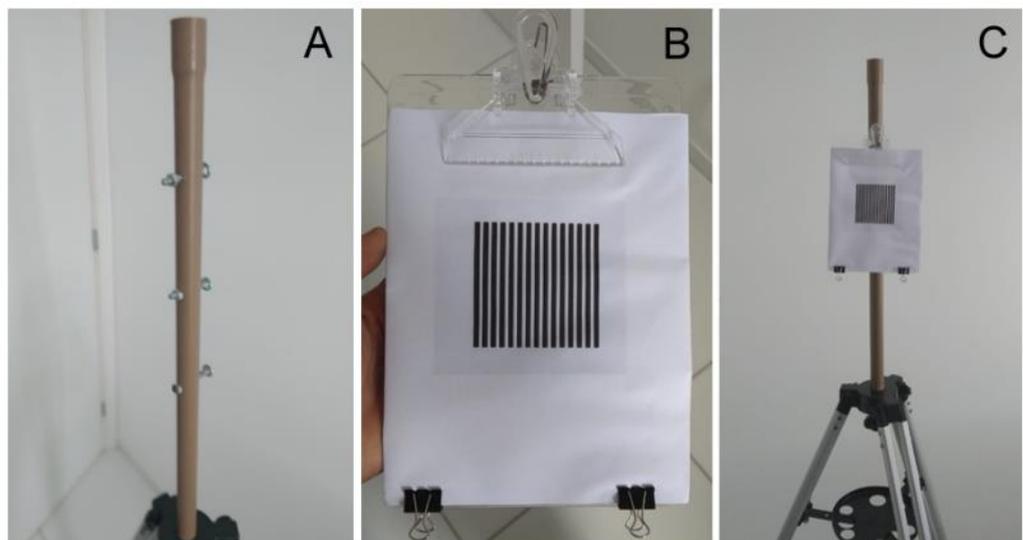
¹ Assegure que a separação entre as linhas é de 2mm na impressão. Padrões para download e impressão disponíveis no endereço
<https://drive.google.com/drive/folders/12Dk_hyYJmkcxsoR7gcQx-H3NO8HfzhD1?usp=sharing>

Figura 4 – Em a) aparece o padrão de linhas montado para aplicação do roteiro. E ao lado direito, b) mostra os materiais utilizados para a realização.



O resultado final da montagem aparece na Figura 5. A montagem é relativamente simples, mas a descrição detalhada da montagem, assim como possíveis adaptações e comentários de algumas dificuldades podem ser encontrados na dissertação.

Figura 5 - Montagem desenvolvida para estudo do critério de Rayleigh através da proposta

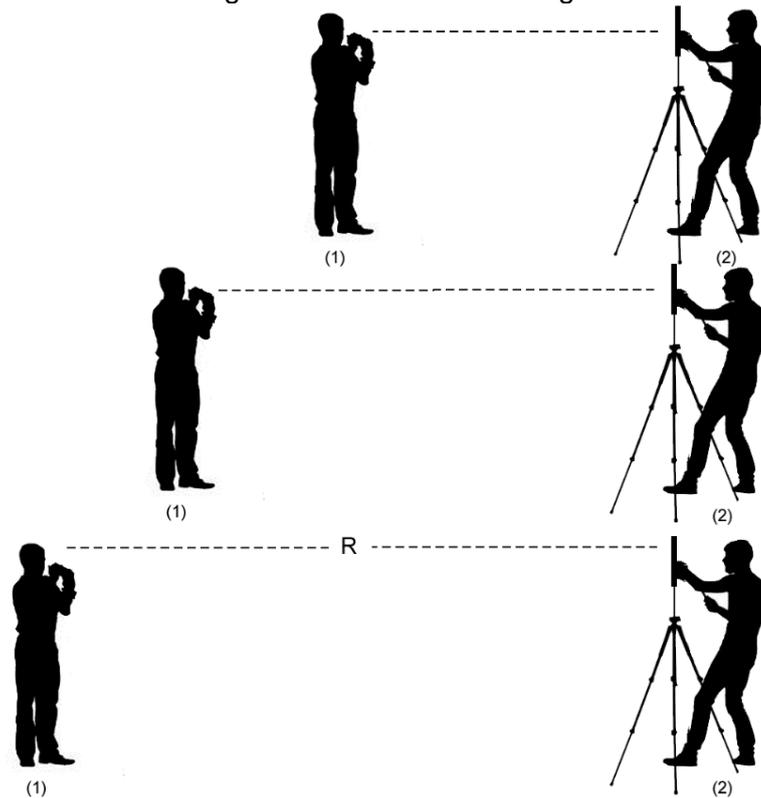


2 - METODOLOGIA

Compreendendo toda abordagem teórica envolvida no processo de perda de resolução, convida os estudantes a participar de um experimento onde poderão vivenciar a perda da capacidade de resolução em uma situação prática. Permitindo-os conhecer suas capacidades de resolução, através dos seguintes passos:

1. O estudante deverá segurar a ponta da trena na posição $S_0=0$ próximo aos olhos. A trena, por sua vez, deve ser posicionada exatamente sobre a prancheta que contém a folha (Ver Fig. 5A).
2. Partindo de uma posição inicial em que consegue resolver individualmente as linhas escuras, ou seja, próximo à folha, onde consegue perceber a separação branca entre as linhas. O estudante deve se distanciar gradativamente da montagem até que não consiga mais perceber a separação clara entre as linhas escuras. Percebendo apenas um quadrado totalmente escuro.
3. Neste momento, mantendo as extremidades da trena fixas, e a trena deve ser tracionada com a intenção de registrar a leitura da distância (R) na qual o estudante perdeu a resolução da separação entre as linhas (Ver Fig. 6).

Figura 6 - Esquema em perspectiva da realização do experimento com o observador se distanciando gradativamente da montagem.



4. Para uma melhor estatística, os passos anteriores 1,2 e 3, devem ser repetidos com todo o grupo. Tomando nota das medidas através da construção de tabela com o formato da Tab. 4. Que tem por objetivo determinar a distância média, em que os estudantes desta turma perdem resolução das linhas.
5. Ao final da aplicação – desde que, sob as mesmas condições de iluminação utilizadas durante a aplicação – com a ajuda de uma régua e uma câmera, faça a estimativa o diâmetro d da pupila de uma parcela dos observadores (Ver Fig. 7).

Figura 7 - Exemplo de medida de diâmetro de pupila.



Tabela 26 - Medida das distâncias mínimas “ R ” para as quais observador passa a não resolver individualmente as linhas.

Observador	R (m)
1	R_1
2	R_2
3	R_3
...	...
n	R_N

Podemos utilizar o valor de $R_{\text{Médio}}$ da turma para determinar o poder de resolução médio do grupo, basta para isto, utilizar a Equação 3. A qual nos permite, por meio dos valores facilmente mensuráveis – da separação entre os objetos observados (x) e a distância ao objeto observado (R) – o cálculo do critério de Rayleigh.

Na pesquisa, foram testadas as resoluções de um total de 141 participantes, nessas aplicações os valores médios encontrado para o critério θ_E , separação das linhas x , diâmetro da pupila d e a distância em que os observadores perdiam resolução R foram listados e são apresentados abaixo na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da aplicação do experimento para as folhas em cores

$\theta_E(\text{rad})$	$(1,97 \pm 0,27) \cdot 10^{-4}$
$X (\text{mm})$	$2,0 \pm 0,5$
$d (\text{mm})$	$3,0 \pm 0,5$
$R (\text{m})$	$10,1 \pm 0,6$

De acordo com a literatura, são esperados valores entre $5 \cdot 10^{-4}$ e $2 \cdot 10^{-4}$ rad de resolução angular a depender das condições de observação, maior poder resolução em condições de pouca iluminação e menor resolução para condições de maior iluminação – variando com o diâmetro da pupila (NAVE R., 2016).

Atente-se ao fato, de que um maior poder de resolução corresponde a um menor valor de θ (Critério de Rayleigh), uma vez que indica a capacidade de resolver objetos com a separação angular menor.

Perceba ainda que obtivemos valor do critério de Rayleigh utilizando uma aproximação da equação 1 para a equação 2. Como forma de análise, é interessante realizar uma comparação do resultado obtido utilizando a equação 1, com a equação 2. Utilizando para tal, o valor medido do diâmetro da pupila d , e o valor médio do comprimento de onda λ para a região do espectro de maior sensibilidade do olho humano 550nm.

Considerações Finais e Contextualização



Como já citado, na aplicação da proposta obtivemos resultados positivos, a mesma desmontou através de uma análise estatística que pode contribuir para o aprendizado de conceitos da ondulatória. Na análise de alguns professores sobre o produto, que consta na dissertação que gerou este material, foi comentado sobre a simplicidade na aplicação da proposta, na objetividade e acessibilidade do material, como em alguns dos nos comentários a seguir:

“O roteiro apresenta um experimento bastante interessante, e que, com certeza, gera entusiasmo na sua execução.”

“O roteiro é bom, objetivo e cumpre sua função... No geral, muito bom. Eu usaria em sala de aula!”

Vale ressaltar a correlação direta entre o conteúdo apresentado e a Astronomia, que como citado, deve ser utilizada como agente motivador na contextualização do problema de resolução. Ao final do trabalho, caso seja interesse do professor, é de bom tom analisar com os estudantes algumas questões problema envolvendo o tema Astronomia e o critério de Rayleigh, apresentadas a seguir:

Questão 1) A cratera Abbot, na Lua, tem um diâmetro de 10km. Estime qual deve ser o diâmetro mínimo de um telescópio localizado na Terra que seja capaz de resolvê-la. Desconsidere efeitos atmosféricos e considere o comprimento de onda médio como 550nm. Distância aproximada Terra-Lua = $3,8 \cdot 10^5$ km.

Questão 2) O planeta-anão plutão encontra-se a uma distância de $4,5 \cdot 10^9$ km da Terra, ele e sua “Lua”, Caronte, estão separados por uma distância de cerca de 19.600km. Desconsiderando os efeitos atmosféricos, determine se é possível resolver individualmente esses objetos utilizando o telescópio do Monte Palomar (5,08m de diâmetro). Considere o comprimento de onda médio como 550nm.

Desta forma, desejo uma boa experiência na aplicação deste produto e para mais detalhes sobre o trabalho tais como a apresentação dos dados, estatística entre outros, consulte a versão completa da dissertação no portal do MP-ASTRO ou no banco da biblioteca central da UEFS.

REFERÊNCIAS

- MÜLLER M., PAULINO R., e FABRIS J. Estudo Experimental do Critério de Rayleigh. Revista Brasileira de Ensino de Física vol. 20, n. 3, Setembro, 1998
- NAVE R., The Rayleigh Criterion. Hyper Physics – Light and Vision. Georgia State University. 2016
- RAYLEIGH. Investigations in optics with special reference to the spectroscope. Resolving, or separating power of optical instruments. Philosophical Magazine, 8, 261–274. New York: Dover, p. 420. 1879
- SHANNON R. & WYANT J. Applied Optics and Optical Engineering, Academic Press Volume IX. New York 1983.
- WOLFGANG R. & COSTAS P. How to beat the Rayleigh resolution limit: A lecture demonstration. American Journal of Physics 70 587-594 2002
- URROME P. & HINRICHS R. College 2019
- VICENZI S.; Difração e Interferência para Professores do Ensino Médio. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.