

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

GABRIEL ROBERTO GARCIA LEVINSKI

A TEORIA DA INSTRUÇÃO DE JEROME BRUNER APLICADA AO APRENDIZADO  
DO ARCO-ÍRIS

PONTA GROSSA  
2023

GABRIEL ROBERTO GARCIA LEVINSKI

A TEORIA DA INSTRUÇÃO DE JEROME BRUNER APLICADA AO APRENDIZADO  
DO ARCO-ÍRIS

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Kniphoff da Cruz

PONTA GROSSA  
2023

L665 Levinski, Gabriel Roberto Garcia  
A teoria da instrução de Jerome Bruner aplicada ao aprendizado do arco-íris /  
Gabriel Roberto Garcia Levinski. Ponta Grossa, 2023.  
203 f.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física - Área de  
Concentração: Física na Educação Básica), Universidade Estadual de Ponta  
Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Kniphoff da Cruz.

1. Ensino de física. 2. Óptica. 3. Formação do arco-íris. I. Cruz, Gerson  
Kniphoff da. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Física na Educação  
Básica. III.T.

CDD: 530.1



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-  
900 - Ponta Grossa - PR - <https://uepg.br>

## TERMO DE APROVAÇÃO

GABRIEL ROBERTO GARCIA LEVINSKI

“A TEORIA DA INSTRUÇÃO DE JEROME BRUNER APLICADA AO APRENDIZADO DO ARCO-IRIS”.

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós Graduação em Ensino de Física, Setor de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Ponta Grossa, 23 de junho de 2023.

Membros da Banca:

Prof. Dr. Gerson Kniphoff da Cruz (UEPG/MNPEF) – Presidente

Prof. Dr. Antônio Sérgio Magalhaes de Castro (UEPG/MNPEF)

Prof. Dr. Milton Thiago Schivani Alves - (DFTE/CCET/UFRN)



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Sergio Magalhaes de Castro, Professor(a)**, em 23/06/2023, às 11:17, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gerson Kniphoff da Cruz, Professor(a)**, em 23/06/2023, às 11:20, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **MILTON THIAGO SCHIVANI ALVES, Usuário Externo**, em 23/06/2023, às 11:22, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **1447877** e o código CRC **A7EE378C**.

Para minhas avós,  
Dona Maria e Francisca.  
*(in memoriam)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à CAPES pelo apoio ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pela qualidade de ensino público ofertado tanto em minha graduação, quanto no mestrado.

Ao meu orientador, professor Dr. Gerson Kniphoff da Cruz, por ser meu guia durante a concepção, execução e avaliação deste projeto.

Aos professores do Departamento de Física da UEPG, que participaram da minha formação e que ajudaram a moldar a mentalidade que deu origem a esse projeto de pesquisa.

Aos colegas que fiz durante os três anos como estudante do polo 35 do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Nossas discussões foram de suma importância para o desenvolvimento das ideias expostas neste trabalho.

Aos alunos e equipe diretiva do Colégio Estadual Alvino Schelbauer, instituição esta que recebeu duas aplicações do produto educacional proposto nesse projeto.

Aos meus pais, Amauri Levinski e Rosângela Garcia, pelo contínuo incentivo para que eu buscasse realizar meus sonhos.

Aos meus amigos, entre os quais destaco Abner Partala, Gabriel Ossovisck, Matheus Menine e João Ricardo de Miranda, que me apoiam diariamente.

## RESUMO

De maneira geral, o ensino de física em sala de aula insiste que o estudante tome posse de um conjunto de conhecimentos para resolver exercícios de fixação. Ele memoriza equações e as aplica, sem que necessariamente aprenda a teoria por trás destes problemas. Em um contexto em que a informação está cada vez mais acessível (e chamativa) fora do ambiente escolar, é indispensável que se busque uma alternativa ao atual modelo de ensino. Foi pensando nisso que este trabalho buscou oferecer uma proposta em que o estudante é o grande protagonista do processo de aprendizagem, que contempla experiências diferentes do já tradicional “quadro e giz”. Neste projeto, o aluno se desenvolve ao passar por uma série de estágios que levam em consideração a forma como ele representa o conhecimento que está sendo formado, sem pular etapas. Baseado na teoria instrucional de Jerome Bruner e na teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior de Gerson K. Cruz, o produto educacional foi dividido em nove partes organizadas e sequenciadas para oportunizar o aprendizado. Os resultados encontrados a partir da aplicação do material mostraram que houve uma significativa melhora na forma como os alunos encaram o conhecimento acerca da formação do arco-íris e dos fenômenos mais importantes da óptica geométrica, fazendo uso do conjunto de símbolos adequado para a sua representação.

**Palavras-chave:** Ensino de física, óptica, formação do arco-íris.

## ABSTRACT

Physics is usually learned in school by having the students work through physics questions. He retains the information in his memory of it and uses it to address issues without necessarily understanding the theory. It is crucial to consider an alternate teaching paradigm in a scenario where material available outside of the classroom is cheaper, more readily available, and more attractive. In view of this, this work aims to provide a proposal in which the student is the protagonist in his learning process, and experiences other than the already conventional "blackboard and chalk" are included. Through a sequence of activities that take into account how the student portrays his information from him, the student in this proposal develops his own knowledge, without skipping any steps. This educational product was separated into nine ordered and sequential segments to offer learning opportunities, based on the instructional concept of Jerome Bruner and Cruz's theory of the real external knowledge generator. Following methodological implementation, the analysis of the results has shown a noticeably improved comprehension of how students perceive knowledge about how a rainbow works and the most fundamental laws in optics. This assumption is reinforced by the results, which demonstrate that the students used a set of appropriate symbols to describe optical phenomena.

**Keywords:** Teaching physics, optics, rainbow formation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Raio de luz incidindo sobre a superfície da água. Parte deste raio é refletido, enquanto a outra parcela é refratada.....	21
Figura 2: Raio de luz incidente sobre uma superfície (lisa) é refletido regularmente.	22
Figura 3 – Raio de luz incidente sobre uma superfície rugosa é refletido de maneira difusa.....	22
Figura 4: Reflexão de um raio de luz incidente sobre uma superfície circular. ....	23
Figura 5: Ilustração esquemática dos fenômenos de reflexão e refração de um raio de luz ocorrendo simultaneamente. ....	23
Figura 6: Refração de um raio de luz. ....	25
Figura 7: (a) Refração de um raio de luz transmitindo de um meio menos refringente para um meio mais refringente; (b) Refração de um raio de luz transmitindo de um meio mais refringente para um meio menos refringente. ....	27
Figura 8: Refração de um raio de luz perpendicular à interface de separação entre dois meios. ....	27
Figura 9: Relação entre o índice de refração $n$ (eixo vertical) e comprimento de onda (eixo horizontal) para os gases oxigênio e nitrogênio. ....	30
Figura 10: Espalhamento da luz branca em um prisma. ....	31
Figura 11: Comportamento de um raio de luz monocromática quando incidente em uma esfera de índice de refração maior que o do meio externo. ....	32
Figura 12: Comportamento de um raio de luz branca quando incidente em uma gotícula esférica de água imersa no ar. ....	33
Figura 13: Representação esquemática análoga à Fig. 12, com todas as cores do espectro visível.....	35
Figura 14: Simplificação da Fig. 12. ....	35
Figura 15: Formação do arco-íris primário e condição de observação do mesmo....	36
Figura 16: Formação do arco-íris primário, com observador posicionado no ponto antissolar e formação do cone. ....	37
Figura 17: Caminho do raio de luz dentro da gotícula para a formação do arco-íris secundário.....	38

Figura 18: Formação do arco-íris secundário e condição de observação do mesmo. .....	38
Figura 19: Interface do simulador “Desvio da luz”, produzido pelo PhET da Universidade do Colorado.....	57
Figura 20: Confecção, a partir do EVA, do suporte para a folha sulfite e da base para a caneta laser.....	60
Figura 21: Fabricação da vedação para o copo cilíndrico.....	61
Figura 22: Disposição do aparato experimental.....	61
Figura 23: Feixes de luz saindo do corpo com água durante a realização do experimento.....	62
Figura 24: Disposição de alfinetes para a marcação dos raios de luz que saem do copo.....	63
Figura 25: Marcação do raio incidente.....	64
Figura 26: Segmentos de retas que passam pelos alfinetes e que representam os raios de luz externos à gota de chuva.....	64
Figura 27: Ilustração dos raios de luz internos à gota de chuva.....	65
Figura 28: Marcação do centro da circunferência que representa a gota.....	66
Figura 29: Marcação da reta normal em relação à superfície da gota.....	67
Figura 30: Reflexão interna que permite a confirmação da lei da reflexão.....	68
Figura 31: Utilização de tira de papel preto para limitar a quantidade de luz que chega até o copo.....	71
Figura 32: Feixe de luz colorida refratando para fora do copo.....	72
Figura 33: Marcação do raio incidente.....	73
Figura 34: Representação dos raios de luz internos e externos à gota marcados através do uso de alfinetes.....	74
Figura 35: Medição do desvio angular sofrido pelo raio de luz ao passar pela gota.	75
Figura 36: Uso do simulador “Desvio da luz” para observar as diferenças na refração sofrida por um raio de luz nas cores vermelho e violeta.....	77
Figura 37: Nuvem de palavras para a primeira imagem da Atividade I da Parte 01..	83
Figura 38: Rede de similitude para a primeira imagem da Atividade I da Parte 01. ...	84
Figura 39: Nuvem de palavras para a segunda imagem da Atividade I da Parte 01.	85
Figura 40: Rede de similitude que representa as respostas para a segunda imagem da Atividade I da Parte 01.....	86
Figura 41: Nuvem de palavras relativa à imagem 03 da Atividade I da Parte 01. ....	87

Figura 42: Rede de similitude que representa as respostas dos alunos para a Imagem 03 da Atividade I da Parte 01. ....	88
Figura 43: Nuvem de palavras para o primeiro “Refleta & Responda” da Parte 01....	89
Figura 44: Rede de similitude para o primeiro “Refleta & Responda” da Parte 01. ....	90
Figura 45: Alunos manipulam o simulador “Desvio da Luz” do PhET Colorado.....	91
Figura 46: Nuvem de palavras para o segundo “Refleta & Responda” da Parte 01...	91
Figura 47: Rede de similitude relativa ao segundo “Refleta & Responda” da Parte 01. ....	92
Figura 48: Ilustrações (produzidas pelos estudantes) de suas hipóteses a respeito da trajetória percorrida pela luz dentro de uma gota de chuva. ....	93
Figura 49: Alunos realizando a prática prevista na Parte 03 do produto educacional. ....	94
Figura 50: Estudantes realizam o experimento proposto na Parte 03. ....	95
Figura 51: Resultados obtidos pelos estudantes após a conclusão das Partes 03 e 04 do produto educacional. ....	96
51a .....	96
Figura 52: Nuvem de palavras relativa ao “Refleta & Responda” da Parte 03. ....	97
Figura 53: Rede de similitude para o “Refleta & Responda” da Parte 03. ....	99
Figura 54: Nuvem de palavras relativa ao questionamento da Parte 04 do produto educacional. ....	101
Figura 55: Rede de similitude obtida a partir das respostas dos estudantes ao questionamento presente na Parte 04 do material instrucional.....	102
Figura 56: Registros, em lousa, dos nomes dos conceitos mais importantes no julgamento dos estudantes.....	103
Figura 57: Aluno realiza a marcação dos ângulos durante a Parte 06 da aplicação do material instrucional. ....	106
Figura 58: Resultados encontrados pelos estudantes na parte 06 do produto educacional. ....	107
Figura 59: Nuvem de palavras relativas ao “Refleta & Responda” da Parte 07. ....	109
Figura 60: Rede de similitude produzida a partir das respostas dos estudantes ao “Refleta & Responda” da Parte 07.....	110
Figura 61: Rede de similitude para as respostas da questão 2 da Parte 09 do material instrucional. ....	112

Figura 62: Resultados coletados para a questão 3 da Parte 09 do produto educacional. ....	113
Figura 63: Nuvem de palavras relativa à questão 4 da Parte 09 do material instrucional. ....	116
Figura 64: Rede de similitude para a questão 4 da Parte 09. ....	116
Figura 65: Representação gráfica dos resultados das respostas dadas à questão 5 da Parte 09 do produto educacional.....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índice de refração de alguns meios materiais .....	25
Tabela 2: Resultados obtidos pelos estudantes durante a realização da Parte 04.	101

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA ÓPTICA E SEU HISTÓRICO</b> .....	15
2.1	O ESTUDO DA ÓPTICA NO ENSINO MÉDIO.....	15
2.2	HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA ÓPTICA .....	17
2.3	FENÔMENOS ÓPTICOS ENVOLVIDOS NA DISPERSÃO DA LUZ .....	21
2.3.1	Reflexão da luz.....	22
2.3.2	Refração da luz .....	24
2.3.3	Dispersão cromática.....	28
2.3.4	A formação do arco-íris clássico .....	31
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL DE ENSINO</b> .....	40
3.1	O AMBIENTE DE APRENDIZAGEM.....	40
3.2	A TEORIA DA INSTRUÇÃO DE JEROME S. BRUNER .....	42
3.3	A TEORIA C.C.R.E. DE GERSON K. CRUZ.....	50
3.4	SÍNDROME DA DEFASAGEM E O REAL CONSTRUTIVISMO .....	53
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	55
4.1	MONTAGEM E APLICAÇÃO DO MATERIAL EM SALA DE AULA .....	55
4.1.1	Primeira etapa .....	55
4.1.2	Segunda etapa .....	57
4.1.3	Terceira etapa .....	58
4.1.4	Quarta etapa .....	65
4.1.5	Quinta etapa .....	68
4.1.6	Sexta etapa .....	70
4.1.7	Sétima etapa .....	75
4.1.8	Oitava etapa .....	77
4.1.9	Nona etapa.....	79
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	81
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	118
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	120
	<b>APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	122

## 1 INTRODUÇÃO

Uma área da física que frequentemente é trabalhada de maneira equivocada em sala de aula é a óptica geométrica. “Equivocada” em virtude de que, com muita frequência, esquece-se que este corpo de conhecimentos tem um enorme potencial para ser abordado na prática com nossos estudantes, a partir de experimentos simples que os permitam conectar a teoria com os fenômenos observados no dia-a-dia. Em substituição a isso, é comum ver a insistência em aulas puramente baseadas em esquemas desenhados nas lousas ou projetados em telas sem que o aluno tenha qualquer vivência do que está sendo estudando. O resultado disso é um indivíduo que utilizará este “aprendizado” apenas para a resolução de provas e não se atentará à forma como ele aparece nas mais variadas experiências da vida cotidiana.

Dentre os muitos motivos desta persistência, podemos citar a ausência de laboratórios de física que tenham uma estrutura mínima para a realização de aulas práticas significativas. Ante esta realidade, o objetivo deste trabalho é oferecer um material instrucional simples de ser utilizado em sala de aula, bem fundamentado no que há de mais concreto entre as teorias de aprendizagem e que oportunize ao aluno o conhecimento acerca de um dos fenômenos mais bonitos da natureza: a formação do arco-íris.

É evidente que para chegar a esta missão final, a caminhada do estudante será repleta de etapas intermediárias. Não há como compreender o arco-íris sem que antes se conheçam os fenômenos de reflexão e refração da luz. E estes, por sua vez, dependem intimamente dos princípios mais fundamentais da óptica geométrica. Desta forma, o produto educacional sugerido aqui apresenta uma questão maior que é, acima de tudo, o fator motivador para que o estudante mergulhe com empenho no processo de aprendizagem. O grande ganho estará na caminhada, naquilo que o aluno pode aprender até chegar na última página do material.

Para atender a essa premissa, temos como objetivos deste trabalho:

Objetivo geral:

- *Apresentar um produto educacional que seja capaz de organizar o aprendizado do aluno a respeito dos fenômenos da óptica geométrica, dentre os quais se destacam a reflexão e a refração da luz e a formação do arco-íris.*

Objetivos específicos:

*- Encorajar o aluno no estudo de fenômenos físicos do dia-a-dia, discutindo os conceitos por trás deles e enxergando a ciência como um processo de construção do conhecimento;*

*- Observar como evolui o aprendizado do aluno a respeito de um tópico de física levando em conta a forma como ele manifesta este conhecimento e evolui em suas formas de representação*

*- Avaliar a eficácia do produto educacional a partir dos resultados coletados em sua aplicação em sala de aula.*

A estrutura desta dissertação se estabelece da seguinte forma: o capítulo 2 traz a teoria física da óptica geométrica clássica que pretendemos ensinar para nossos estudantes. Além disso, esta seção também será composta por uma pequena incursão histórica a respeito dessa importante área da ciência. Já o capítulo 3 descreve o referencial de ensino que baseia o produto educacional proposto, enquanto também faz uma defesa da necessidade da adoção de ambientes de aprendizagem, em desfavor do que chamamos de “ensino tradicional”. O capítulo 4 apresenta os materiais e metodologias utilizadas para a aplicação do material instrucional e também traz mais detalhes acerca da montagem de alguns experimentos que aparecem durante o seu emprego. Os capítulos 5 e 6 são reservados para a descrição e análise dos resultados colhidos a partir do uso do produto em sala de aula e as considerações finais, respectivamente.

É importante salientar o contexto no qual este projeto foi empreendido. O Novo Ensino Médio adotado no Brasil traz consigo a necessidade de se colocar o estudante no centro do processo de aprendizagem. De modo semelhante, a pandemia do coronavírus que assolou o mundo entre os anos de 2020 e 2022 modificou muito o aluno que temos hoje em sala de aula. Por conta disso, trabalhos como esse têm a importante missão de alterar a forma como se enxerga o processo educativo no mundo atual. Mundo este cada vez mais tecnológico e onde concepções antigas a respeito da forma como se estrutura a escola não têm mais lugar.

## 2 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA ÓPTICA E SEU HISTÓRICO

A física, tal como as outras ciências, desenvolveu-se através de um processo histórico que envolve investigação de fenômenos. E investigação exige observação, análise de variáveis importantes, sugestão de hipóteses e testes de teorias que busquem explicar a ocorrência do acontecimento. A óptica é um ramo da física que não funciona de maneira diferente. Desde os tempos mais remotos, o ser humano sempre apresentou curiosidade para desvendar o movimento dos corpos celestes ou as “ilusões de ótica” comuns do dia-a-dia.

Compreender a óptica como algo que se desenvolveu a partir da descoberta de princípios e leis que regem os fenômenos relacionados à luz é uma das funções da física no ensino médio. Mais do que isso: inserir o aluno no contexto da investigação científica é condição fundamental para a formação de um aprendiz capaz de exercer sua cidadania no futuro. O que se objetiva é um cidadão capaz de, defrontado a um problema, saber reunir informações e ferramentas e combiná-las para solucioná-lo.

Este capítulo busca justificar, com base na literatura, a presença e a importância do ensino da óptica. Além disso, tem por finalidade fornecer uma breve visão a respeito do histórico da evolução deste ramo da física. Contudo, muitos eventos marcantes foram deixados de lado por nossa abordagem, o que torna indispensável a consulta da bibliografia indicada para maiores detalhes.

### 2.1 O ESTUDO DA ÓPTICA NO ENSINO MÉDIO

Segundo Zilio (2007), a óptica é definida como o ramo da física que estuda a natureza da luz, sua propagação e a forma como ela interage com a matéria. Com o passar da história e com o desenvolvimento da ciência, houve a necessidade da fragmentação da óptica em pelo menos três categorias.

Estas categorias são: óptica geométrica, física e quântica. Para Nussenzveig (1998, p. 1), a óptica geométrica é aquela interessada na propagação da luz e está fortemente ancorada na teoria da natureza corpuscular da mesma. Reflexão e refração são fenômenos que podem bem ser representados com a simplicidade desta

abordagem. A óptica física, por sua vez, tem atenção especial aos aspectos apresentados pela luz que são característicos da propagação de ondas eletromagnéticas. A difração, a dispersão e a interferência da luz ganham destaque especial nesta categoria.

A óptica quântica, por sua vez, é mais recente e está presente na concepção de teorias que levam em conta a interação da luz com a matéria. Tópicos de física moderna estão associados intimamente à óptica quântica e nela existe uma relação complementar entre as teorias corpuscular e ondulatória (NUSSENZVEIG, 1998, p. 2).

Buscando simular o processo de descoberta dos cientistas ao longo da história, o estudo da óptica por meio de uma abordagem investigativa é bastante beneficiado pelo que os principais documentos normativos da educação básica preveem para a física no ensino médio. Para a Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

A abordagem investigativa deve promover o protagonismo dos estudantes na aprendizagem e na aplicação de processos, práticas e procedimentos, a partir dos quais o conhecimento científico e tecnológico é produzido. Nessa etapa da escolarização, ela deve ser desencadeada a partir de desafios e problemas abertos e contextualizados, para estimular a curiosidade e a criatividade na elaboração de procedimentos e na busca de soluções de natureza teórica e/ou experimental (BRASIL, 2018, p. 551).

Como veremos na subseção seguinte, a óptica desenvolveu-se historicamente muito em função da curiosidade do ser humano pela exploração de fenômenos observados cotidianamente. Ao ter contato com eles, filósofos e cientistas debruçaram-se em busca de respostas, propondo hipóteses e testando-as na sequência. Quando a BNCC privilegia a abordagem investigativa, a física e a óptica surgem como elementos decisivos para a emissão de soluções para questionamentos comuns do dia-a-dia.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCN+), publicados em 2002, estão em sintonia com o que é estabelecido pela BNCC, tendo em vista que estimulam a elaboração de modelos simplificados que busquem auxiliar o aprendiz na emissão de hipóteses e resolução de problemas abertos de física (BRASIL, 2002, p. 66).

Os PCN+ são organizados em seis grandes temas estruturadores do estudo da física no ensino médio. O terceiro deles é chamado de “Som, imagem e informação”

e uma de suas unidades temáticas versa especificamente sobre o ensino da óptica. Algumas das competências previstas são:

- Identificar objetos, sistemas e fenômenos que produzem imagens para reconhecer o papel da luz e as características dos fenômenos físicos envolvidos;
- Associar as características de obtenção de imagens a propriedades físicas da luz para explicar, reproduzir, variar ou controlar a qualidade das imagens produzidas (BRASIL, 2002, p. 75).

Isso significa que, ao conhecer os princípios e leis que regem a óptica, o aprendiz será capaz não apenas de identificar fenômenos, mas atuar sobre eles, resolvendo problemas. Uma vez que na atualidade estamos cada vez mais cercados por equipamentos que fazem uso de sistemas de transporte de informações (tal como a fibra óptica), torna-se cada vez mais indispensável o desenvolvimento de tais competências.

Mesmo tendo consciência desta importância, não é o que se verifica nas salas de aula na atualidade. Segundo Gircoreano e Pacca (2001, p. 27), o ensino da óptica é desconectado da realidade, uma vez que foca seus esforços em fazer o aprendiz considerar apenas aspectos geométricos, dissociados das características físicas da luz, de sua propagação e da forma como ela interage com a matéria.

Todos esses elementos sempre são indicados por retas e pontos num plano, sem ficar evidente que a luz se propaga num espaço tridimensional, que há uma fonte de luz e que existem obstáculos para a propagação. Os aspectos concernentes à natureza da luz, sua interação com a matéria e sua ligação com o processo de visão, também são, em geral, desconsiderados (GIRCOREANO; PACCA, 2001, p. 27).

O que buscamos propor nesta dissertação vai no sentido contrário ao que observamos na citação anterior. Além dos aspectos geométricos, objetivamos inserir os estudantes no contexto da investigação científica dos fenômenos ópticos, compreendendo a relação que eles possuem com a ocorrência do arco-íris.

## 2.2 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA ÓPTICA

Historicamente, o desenvolvimento da óptica se relaciona com o estudo da natureza da luz. Estabelecer se ela é onda ou partícula fez parte das discussões mais fervorosas desde o século XVII. Entretanto, antes de partir para este debate acerca

de suas características, precisamos nos conscientizar ante da necessidade do estudo da luz dentro da história. Tudo tem início na curiosidade do ser humano para explorar o céu.

Para Barros e Carvalho (1998, p. 85), a astronomia e a compreensão de como os objetos podiam ser visualizados pelo ser humano eram focos de interesse desde os filósofos gregos da Antiguidade, passando pelos árabes, em XI d.C. Por mais de 20 séculos, para melhor análise dos astros, por sua vez, era necessário confeccionar instrumentos bons o suficiente para observar com precisão os movimentos da lua, de planetas e o comportamento das estrelas. Estas ferramentas faziam uso de combinações de lentes e/ou espelhos, que são objetos que fazem parte do cotidiano da óptica geométrica (ZILIO, 2007).

Em razão desta necessidade, os pesquisadores viam-se provocados a compreender a teoria por trás da óptica para aprimorar seus equipamentos. Entretanto, este ramo da física teve um salto qualitativo durante o século XVII, quando a matematização de fenômenos como a reflexão e a refração permitiu a explicação de diversos aspectos da óptica conhecida até então (ZILIO, 2007).

No ano de 1621, segundo Zilio (2007), o astrônomo holandês Willebrord Snell (1591-1626) introduziu uma importante lei para a refração. Este fenômeno já havia sido analisado anteriormente por Johannes Kepler (1571-1630), que coletou e interpretou dados para a refração com pequenos ângulos. Contudo, Snell fez mais: sua lei era capaz de prever o desvio angular de raios de luz para sistemas ópticos mais complexos, impossíveis de serem analisados pelas contribuições de Kepler.

Alguns anos depois, em 1637, o filósofo francês René Descartes (1596-1650) confirmou a lei de Snell, redescobri-a. Além disso, formulou uma explicação para a luz baseada na propagação de ondas de pressão em um meio perfeitamente elástico. Para Silva (2006, p. 12), Descartes foi um dos responsáveis por colocar a natureza da luz como objeto de estudo, representando uma mudança de paradigma na óptica que era estudada até então.

Robert Hooke (1635-1703), físico inglês da Royal Society de Londres, registrou no livro "Micrografia" observações de experimentos que mostravam a luz apresentando comportamentos característicos de ondas, como a difração e a interferência (SILVA, 2006, p. 14). Ele reproduziu os experimentos de formação de padrões coloridos de interferência em filmes finos do monge Francesco Maria Grimaldi

(1618-1663) e propôs que a luz tinha origem em um movimento ondulatório no meio cuja velocidade era altíssima (ZILIO, 2007).

Em 1666, Isaac Newton (1642-1727) inicia seus estudos sobre a luz.

Em suas experiências sobre as cores Newton descobriu o fenômeno da dispersão. Convencido de que essas cores estavam presentes na própria luz branca e que as mesmas não foram criadas no prisma, Newton realizou um outro tipo de experiência na qual fez passar cores do arco-íris por um segundo prisma invertido em relação ao primeiro, reproduzindo, dessa forma, em uma tela, a luz branca original (SILVA, 2006, p. 15).

De posse deste conceito, foi Newton quem explicou acerca do fenômeno da formação do arco-íris como resultado de reflexões e refrações da luz solar no interior de uma gota. Além disso, associou corretamente a existência do arco-íris secundário a uma segunda reflexão no interior da gotícula (SILVA, 2006, p. 15).

Newton é frequentemente descrito como grande defensor da teoria corpuscular da luz. Segundo Zilio (2007), Newton afirmava que a luz era composta de pequenas partículas emitidas por corpos brilhantes e esta abordagem explicaria fenômenos como a reflexão, por exemplo. Nela, os corpúsculos colidiriam elasticamente com a superfície refletora de um espelho, retornando para o meio de onde vieram.

Entretanto, o professor Moysés Nussenzveig aponta uma divergência histórica:

Os fenômenos da ótica geométrica são compatíveis com a teoria corpuscular da luz, da qual se costuma (erroneamente) citar Newton como principal partidário. A teoria rival, a teoria ondulatória da luz teve sua primeira grande contribuição no "Tratado sobre a luz" de Christian Huygens, publicado em 1690, onde se encontra formulado o Princípio de Huygens, que desempenha um papel fundamental no tratamento da propagação das ondas (1998, p. 1).

O fato é que, segundo Zilio (2007), o século XVIII foi marcado pela teoria corpuscular, mesmo com a aceitação das evidências dos aspectos ondulatórios da luz. Como explicitado por Nussenzveig anteriormente, Huygens (1629-1695) surge, ainda no século XVII, como grande defensor da teoria ondulatória através de seus princípios que explicam muito dos fenômenos ópticos observados. É importante salientar que, para Silva (2006, p. 17), Huygens acreditava que a onda luminosa era longitudinal, semelhante a sonora.

O experimento da dupla fenda de Thomas Young (1773-1829), que abordava a interferência de ondas luminosas, realizado entre 1801 e 1803, foi muito criticado pela comunidade científica da época. Contudo, foi neste mesmo século (XIX), que a teoria ondulatória começou a ser reconsiderada (ZILIO, 2007). Kirchhoff (1824-1887) foi responsável por garantir uma formulação matemática rigorosa ao princípio de Huygens e, com isso, recolocar a luz como onda novamente na ordem do dia ao explicar o fenômeno da difração.

A óptica e o eletromagnetismo eram ramos da física independentes até a publicação do trabalho de James Clerk Maxwell (1831-1879), em 1865 (SILVA, 2006, p. 34). De posse do formato diferencial de importantes leis do eletromagnetismo, Maxwell concebeu a definição de corrente de deslocamento, reescreveu a lei de Ampère e combinou as expressões que conhecemos como equações de Maxwell. O resultado disso foi uma equação de onda que se propaga com a velocidade de aproximadamente 300.000 km/s, isto é, a velocidade da luz (NUSSENZVEIG, 1998, p. 171).

A conclusão parecia óbvia: a luz era uma onda que se propagava perpendicularmente à vibração de campos elétricos e magnéticos. Isto é, uma onda eletromagnética. Os raios de luz, ferramenta básica da óptica geométrica, são, na realidade, os raios de onda que representam a propagação da onda eletromagnética (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Uma vez que ondas mecânicas necessitavam de um meio para se propagar, era natural pensar que as ondas eletromagnéticas também precisavam de um. Segundo Zilio (2007), o éter era considerado este meio e as consequências do debate a respeito de sua existência deram origem à relatividade, que marcou o século XX. Foi neste mesmo período de tempo que a teoria corpuscular voltou a ser considerada, estando por trás da compreensão de fenômenos como o efeito fotoelétrico e a radiação emitida por corpos negros.

Esta seção está longe de ter por objetivo descrever toda a história da natureza da luz, mas sim, apenas focar naquelas conclusões mais importantes para o prosseguimento das discussões nos próximos capítulos. Contudo, não podemos deixar de citar cientistas que colaboraram de maneira decisiva para a determinação do que é a luz. Galileu Galilei, Pierre de Fermat, Étienne Louis Malus, David Brewster, Jean Fresnel, Simeón Denis de Poisson, Johann Friedrich Gauss, Armand Louis

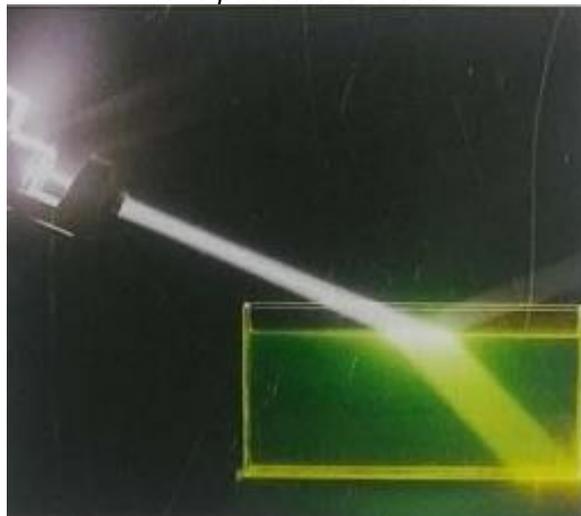
Fizeau, Bernard Foucault – que trabalhou para a determinação da velocidade da luz –, Michael Faraday e Heinrich Hertz são apenas alguns destes nomes.

### 2.3 FENÔMENOS ÓPTICOS ENVOLVIDOS NA DISPERSÃO DA LUZ

Dois dos fenômenos mais estudados na óptica geométrica são a reflexão e a refração da luz. Ambos podem ocorrer quando a luz, que se propaga em um meio material, encontra a interface de separação deste com outro. Levando em consideração que os dois meios são transparentes, homogêneos e isotrópicos – isto é, a luz pode se propagar por eles –, parte dela será refletida e parte será refratada (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Tomemos um exemplo: o raio de luz se propaga pelo ar até chegar à superfície que o separa da água de um rio. Parte da onda luminosa será refletida, como se “ricocheteasse” na interface, enquanto que a outra parcela será transmitida para a água (refração) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). A figura 1 ilustra estes fenômenos.

*Figura 1 – Raio de luz incidindo sobre a superfície da água. Parte deste raio é refletido, enquanto a outra parcela é refratada.*



Fonte: Fundamental Photography (1974).

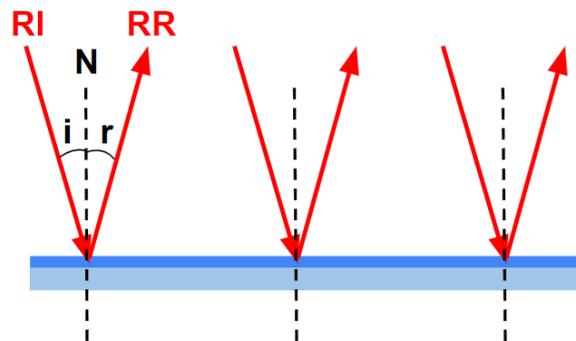
As próximas subseções serão dedicadas para explorar as especificidades destes fenômenos separadamente. Começamos pela reflexão da luz.

### 2.3.1 Reflexão da luz

Conforme vimos anteriormente, a reflexão consiste na mudança de caminho do raio luminoso quando ele encontra a superfície de um rio ou de um espelho, por exemplo. Podemos dizer que neste fenômeno, não há transmissão e o raio retorna para o meio de onde veio.

Contudo, a reflexão pode ocorrer de duas maneiras, a depender do tipo da superfície em que o raio intercepta. Quando esta é lisa, bem polida e os raios se espalham num mesmo ângulo com relação a uma reta perpendicular (normal) à superfície, atribuímos a classificação de reflexão especular ou regular (YOUNG; FREEDMAN, 2008). É este o tipo de fenômeno que permite com que nos observemos em um espelho plano e está representado na Figura 2.

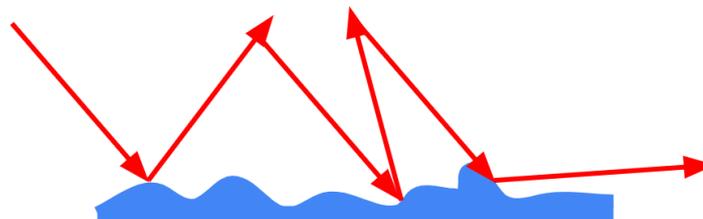
Figura 2: Raio de luz incidente sobre uma superfície (lisa) é refletido regularmente.



Fonte: Autor.

Já a reflexão difusa ocorre quando os raios de luz são espalhados de maneira disforme, com variados ângulos com relação às retas normais à superfície. Isso acontece quando a mesma apresenta formato irregular, rugoso (YOUNG; FREEDMAN, 2008). A figura 3 representa este tipo de reflexão.

Figura 3 – Raio de luz incidente sobre uma superfície rugosa é refletido de maneira difusa.



Fonte: Autor.

É graças à reflexão difusa que podemos enxergar os objetos ao nosso redor, como canetas, xícaras e computadores (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

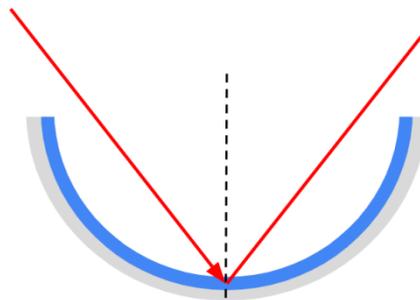
Existe uma condição a respeito da reflexão da luz que vale para qualquer tipo de superfície, seja ela lisa ou rugosa, plana ou circular. A referida condição é fundamental e estabelece que os raio incidente (RI) e a normal (N) definem um plano e o raio refletido (RR) está contido no mesmo plano. Trata-se do plano de incidência, que é definido pelas retas RI e N.

A partir da figura 2 iremos enunciar a lei da reflexão.

O ângulo de incidência  $i$  (formado entre o raio incidente e a reta perpendicular à superfície) é igual ao ângulo de reflexão  $r$  (formado entre a normal e o raio refletido) (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Como já exposto acima, esta lei da reflexão também vale para superfícies circulares:

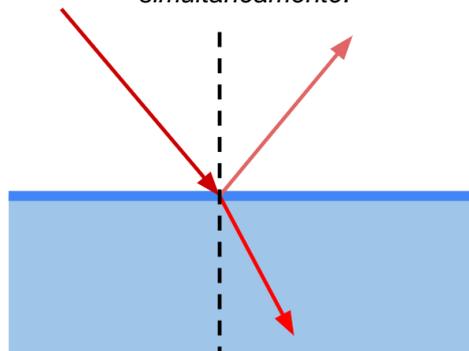
*Figura 4: Reflexão de um raio de luz incidente sobre uma superfície circular.*



Fonte: Autor.

Entretanto, este não é o único fenômeno óptico que pode ser verificado na imagem 1. Observe a ilustração 5 abaixo.

*Figura 5: Ilustração esquemática dos fenômenos de reflexão e refração de um raio de luz ocorrendo simultaneamente.*



Fonte: Autor.

A imagem 5 e a imagem 1 são análogas. Note que parte do raio luminoso que se propaga pelo ar e intercepta a superfície passa para a água, sofrendo um desvio angular. Este é o fenômeno da refração.

### 2.3.2 Refração da luz

A refração da luz é um fenômeno óptico que se observa quando os raios luminosos passam de um meio homogêneo e transparente para outro com estas mesmas características. Um exemplo é a luz que se propaga no vácuo com velocidade  $c$  (sendo que  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s), ao penetrar outros meios, tem sua velocidade reduzida a  $v$ .

É a partir da relação entre as velocidades da luz  $c$  no vácuo e  $v$  no meio estudado que definimos o que chamamos de índice de refração absoluto, simbolizado pela letra  $n$  (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Por definição:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Uma vez que o índice de refração é uma razão entre velocidades (medidas, no Sistema Internacional, em m/s),  $n$  é uma grandeza adimensional.

Além disso, como  $v$  é menor ou no máximo igual a  $c$ , o mínimo valor para o índice de refração é 1,00, para quando  $v = c$ , isto é, no vácuo. Em qualquer outro meio material, tal como água, vidro, óleo ou diamante,  $n > 1$ .

O ar, por sua vez, tem índice de refração muito próximo ao do vácuo, sendo de aproximadamente  $n = 1,0003$ . Desta forma, é conveniente utilizar este valor como 1,00 nos casos em que iremos estudar (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

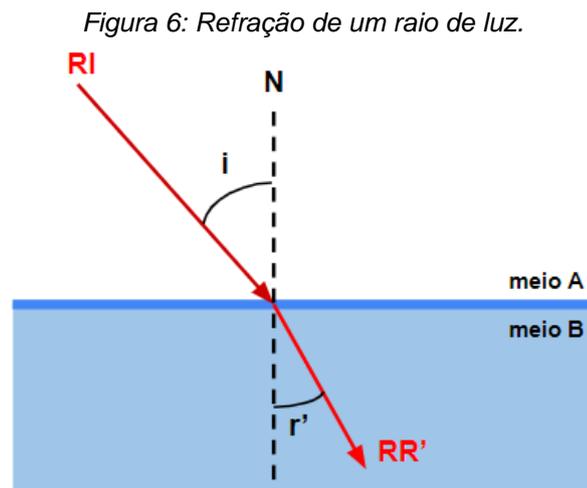
O Tabela 1 abaixo traz informações a respeito do índice de refração  $n$  para alguns materiais.

Tabela 1: Índice de refração de alguns meios materiais

	SUBSTÂNCIA	ÍNDICE DE REFRAÇÃO
SÓLIDOS	Gelo	1,309
	Quartzo	1,544
	Diamante	2,417
	Vidro flint leve	1,58
	Vidro flint denso	1,66
LÍQUIDOS (20 °C)	Água	1,333
	Etanol	1,36
	Glicerina	1,473
	Benzeno	1,501

Fonte: Young e Freedman, 2008.

A imagem 6 abaixo é a esquematização do fenômeno da refração. Nela, podemos observar componentes importantes, tais como o raio incidente, o raio refratado, a reta normal, o ângulo de incidência e o ângulo de refração.



Fonte: Autor.

Tal como a reflexão, a refração também é um fenômeno regido por uma lei, cujo enunciado é:

A razão entre o seno do ângulo de incidência  $i$  e o seno do ângulo de refração  $r'$  é igual ao inverso da razão entre os índices de refração do meio que contém o raio refratado ( $n_B$ ) e do meio que contém o raio incidente ( $n_A$ ) (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

É conveniente lembrar novamente que a lei descrita acima segue a condição fundamental de que o plano de incidência contém os raios incidente (RI), refratado (RR') e a reta normal (N).

Matematicamente, a lei pode ser escrita como:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r')} = \frac{n_B}{n_A} \quad (2)$$

Ou então, como é mais comum:

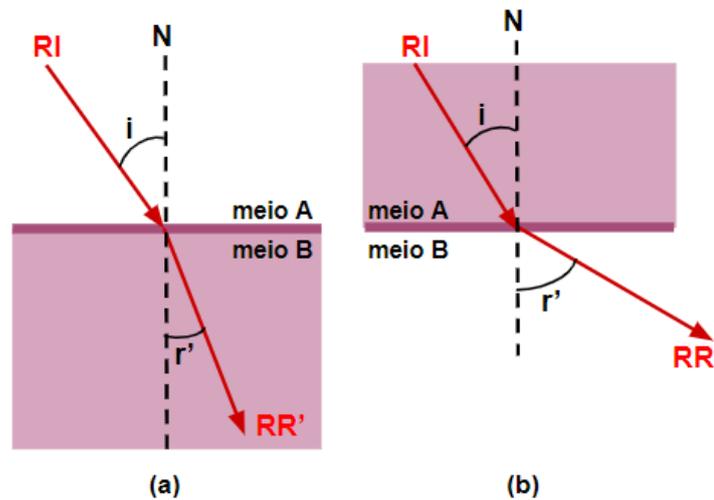
$$n_A \text{sen}(i) = n_B \text{sen}(r') \quad (3)$$

A expressão (2) pode ser utilizada para analisarmos o desvio do raio luminoso quando esse passa de um meio com maior índice de refração (tido como “mais refringente”) para um meio de menor valor de  $n$  (ou “menos refringente”) e vice-versa.

Na imagem 7.a observamos que a luz parte de um meio A e penetra a interface de separação com um meio B sendo que  $n_B > n_A$ . Neste caso, a razão  $n_B/n_A$  é maior que 1, o que implica que  $\text{sen}(i) > \text{sen}(r')$ . Como o seno é uma função trigonométrica crescente no primeiro quadrante,  $i > r'$ . Em outras palavras, o ângulo de incidência é maior que o ângulo de refração, logo concluímos que, quando a luz passa de um meio menos refringente para um meio mais refringente, o raio refratado se desvia aproximando-se da normal (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Por sua vez, na imagem 7.b vemos que a luz chega de um meio A e penetra a interface de separação com um meio B sendo que  $n_B < n_A$ . Neste caso, a razão  $n_B/n_A$  é menor que 1, o que implica que  $\text{sen}(i) < \text{sen}(r')$ . Pelos mesmos argumentos matemáticos expostos anteriormente,  $i < r'$ . Ou seja, o ângulo de incidência é menor que o ângulo de refração, o que implica que quando a luz passa de um meio mais refringente para um meio menos refringente, o raio refratado se desvia afastando-se da normal (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Figura 7: (a) Refração de um raio de luz transmitindo de um meio menos refringente para um meio mais refringente; (b) Refração de um raio de luz transmitindo de um meio mais refringente para um meio menos refringente.



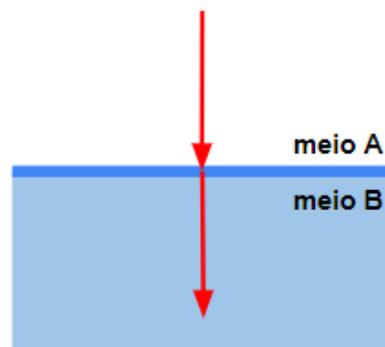
Fonte: Autor.

A equação (2) é conhecida como Lei de Snell, que foi descoberta em 1621 por Willebrord Snell e, em 1637, redescoberta pelo físico, matemático e filósofo René Descartes (NUSSENZVEIG, 1999). Esta lei traz consigo uma série de consequências importantes.

Quando o raio de luz incide perpendicularmente à superfície de separação entre os dois meios, ele é transmitido para o outro material e varia sua velocidade de propagação sem sofrer o desvio angular verificado na figura 6. Nesta situação, o raio transmitido é paralelo ao raio incidente (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Esta situação está representada na figura 8.

Figura 8: Refração de um raio de luz perpendicular à interface de separação entre dois meios.



Fonte: Autor.

Esta transmissão sem desvio do raio de luz é muito importante, pois é este caso especial que define o eixo óptico que será utilizado em nosso estudo da formação do arco-íris.

Nestas duas últimas subseções trabalhamos a reflexão e a refração de maneira separada, mas sempre tendo em vista que um mesmo raio de luz incidente em uma superfície pode sofrer os dois fenômenos estudados simultaneamente. Um efeito disso aparece sobre a energia transportada pela luz, que se divide entre a reflexão e a refração. Podemos notar, da figura 1, que o raio refratado para dentro da água é menos intenso que o raio incidente e uma explicação para isso é que parte da energia luminosa que vinha do meio material anterior também foi destinada para a onda de luz refletida.

A expressão (1) define o índice de refração absoluto de um meio como a razão entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz neste meio ( $v$ ). Entretanto, o índice de refração não depende apenas de aspectos relacionados à substância em que a luz se propaga, mas também do comprimento de onda desta radiação (YOUNG; FREEDMAN, 2008). A próxima subseção tratará sobre a influência das características ondulatórias da luz na refração e do fenômeno da dispersão cromática.

### 2.3.3 Dispersão cromática

Consideremos um feixe composto por vários raios de luz paralelos, cada qual com uma cor diferente – ou seja, cada um com um comprimento de onda  $\lambda$  distinto. Ao incidir na superfície de separação entre um meio e outro, nota-se que o ângulo de refração é diferente para cada raio (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). Isto é um indicativo de que o fenômeno explorado não depende apenas da substância que constitui o meio material, mas também de propriedades ondulatórias da luz.

A luz visível faz parte do espectro eletromagnético e, por esse motivo, apresenta características de ondas e pode ser estudada a partir dos princípios da ondulatória.

Qualquer onda – o que inclui a luz – pode ter sua velocidade de propagação  $v$  calculada pela expressão abaixo:

$$v = \lambda f \quad (4)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $f$  é a frequência, medida em Hz (hertz).

Adaptando a equação (4) para a luz que se propaga no vácuo, temos:

$$c = \lambda_0 f' \quad (5)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da onda de luz associada ao vácuo e  $f'$  é a frequência da onda no vácuo. Ao ser transmitida de um meio para o outro, a frequência da onda permanece constante. Isso se explica a medida que compreendemos que frequência, por definição, é número de oscilações por unidade de tempo e o contorno não tem a capacidade nem de criar, tampouco de destruir onda (YOUNG; FREEDMAN, 2008). Desta forma:

$$f = f' \quad (6)$$

Combinando (4) e (5) com (6):

$$\frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \quad (7)$$

Manipulando a expressão (7), chegamos a:

$$\frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (8)$$

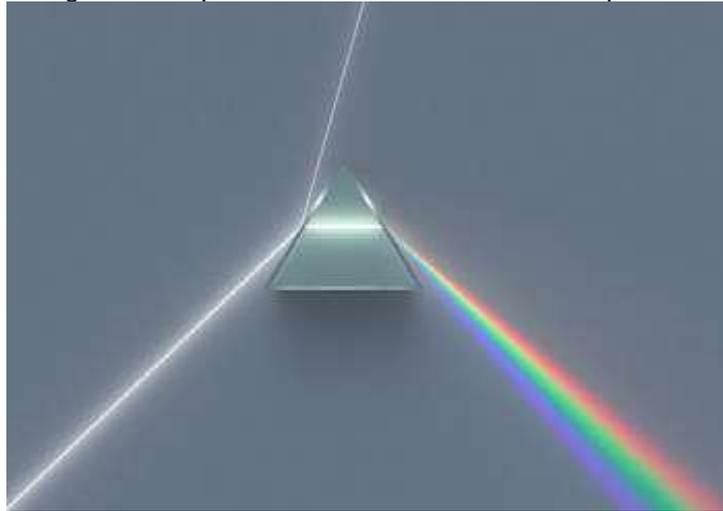
Combinando (8) com a equação (1):

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (9)$$

Pela expressão (9) podemos depreender que o índice de refração do meio depende, também, do comprimento de onda da luz incidente na interface de separação. Mais do que isso: podemos observar que o valor de  $n$  é inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz no meio. Os gráficos abaixo demonstram esta relação para os gases oxigênio ( $O_2$ ) e nitrogênio ( $N_2$ ).



Figura 10: Espalhamento da luz branca em um prisma.



Fonte: <<http://profbiriba.blogspot.com/2011/01/aula-dispersao-da-luz-por-um-prisma.html?m=0>>.

É possível observar a partir da imagem 10 que a luz que emerge do prisma tem a cor vermelha como sendo a componente que menos se afastou da normal à face. Por outro lado, a cor violeta foi aquela que mais se afastou da reta perpendicular à mesma superfície.

Isso se explica pela relação estabelecida anteriormente de que o índice de refração será maior para os menores comprimentos de onda. Além disso, quanto maior for o valor de  $n$ , maior será o desvio. A cor vermelha tem um comprimento de onda de aproximadamente 650 nm, enquanto que o violeta, no extremo oposto do espectro visível, possui um  $\lambda$  de aproximadamente 400 nm. Para o raio de luz que emerge do prisma, o violeta desvia mais, enquanto que o vermelho, menos. Esta relação será provada matematicamente na subseção a seguir (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

É conveniente dizer que o fenômeno da dispersão luminosa não ocorre apenas com o prisma. O mesmo fenômeno pode ser observado quando combinamos gotas de chuva com um dia de sol.

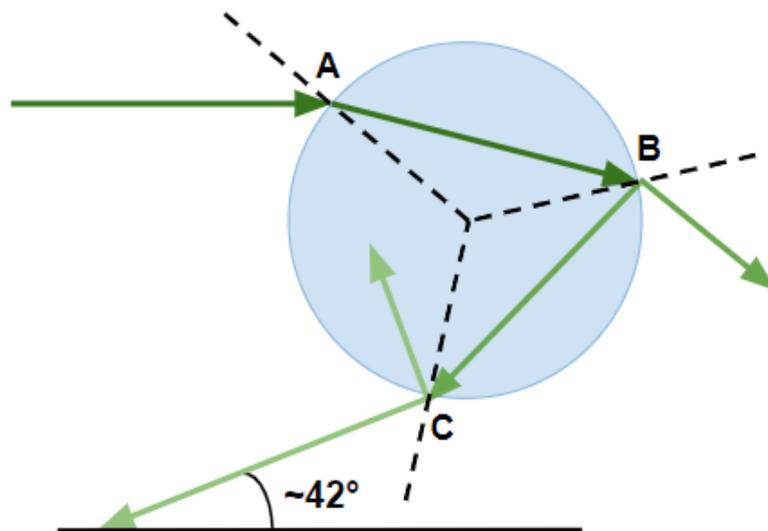
#### 2.3.4 A formação do arco-íris clássico

Iniciaremos nossa explanação a respeito da formação do arco-íris com uma simplificação: verificaremos o caminho da luz dentro da gotícula com uma radiação monocromática para só depois considerar o caso em que a luz branca participa do fenômeno. A diferença é que, para o segundo caso, além dos fenômenos da reflexão

e da refração já verificadas com a luz monocromática, haverá ainda a dispersão cromática, resultando na formação do arco-íris.

Observe a imagem 11 abaixo: um raio de luz monocromática *verde* vem pela direita e “entra” na gota pelo ponto A. Ao passar do ar para a água, a luz perde velocidade, sofrendo uma primeira refração. Tendo em vista que a radiação vem de um meio com menor índice de refração para outro mais refringente, o desvio do raio de luz será no sentido de se aproximar da reta normal à superfície da gota (NUSSENZVEIG, 1977).

*Figura 11: Comportamento de um raio de luz monocromática quando incidente em uma esfera de índice de refração maior que o do meio externo.*



Fonte: Autor, adaptado de YOUNG; FREEDMAN, 2008.

Aqui cabe uma consideração importante: estamos levando em conta a gotícula como uma esfera. As leis da refração e da reflexão nos permitem dizer que os raios incidente, refletido e a reta normal à superfície estão contidos todos no mesmo plano. Isso significa que podemos fazer esta análise considerando uma seção reta circular tal como a representada na imagem 11.

O círculo com o qual estamos trabalhando nos traz uma vantagem bastante relevante. A normal à sua superfície é facilmente obtida, pois ela é simplesmente a reta que passa pelo centro da circunferência. Desta forma, conseguimos anotar os ângulos de incidência, reflexão e refração com relativa facilidade.

Como observamos na imagem 11, o raio de luz monocromática segue seu caminho dentro da gota. Na face interna posterior, no ponto B, há a ocorrência de dois

fenômenos simultaneamente. Parcela da luz reflete, enquanto a outra parte refrata (NUSSENZVEIG, 1977).

É em virtude da refração da luz para fora da gota nesta face posterior que temos uma redução da intensidade luminosa. Isto é, a radiação que continua transitando dentro da gotícula é mais “fraca” do que a que chegou ao ponto B.

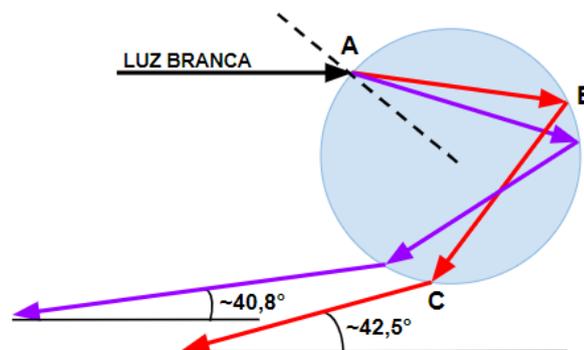
Já no ponto C, a luz é novamente refletida e refratada para fora da gota e chega, por exemplo, aos olhos de um observador que está de pé sobre uma superfície plana e horizontal. O ângulo formado entre o raio de luz que emerge da gota pelo ponto C e a horizontal é de, aproximadamente,  $42^\circ$  (MENEZES *et al*, 2019).

Todas as informações descritas acima podem ser obtidas analisando com atenção a figura 11.

Entretanto, a luz solar não é monocromática. Como já vimos anteriormente, a cor branca é a composição de todos os comprimentos de onda do espectro visível. A consequência disso é que, ao sofrer refração, também haverá dispersão cromática das várias componentes que formam a luz branca. É exatamente o que ocorre para a formação do arco-íris.

A imagem 12 mostra o caminho da luz branca advinda do Sol quando incidente sobre uma gotícula esférica de chuva. A análise é basicamente a mesma que com a luz monocromática, contudo, com um adicional: a dispersão. Desta forma, focamos nossa atenção nos raios que representam os dois extremos do espectro visível: o vermelho e o violeta.

Figura 12: Comportamento de um raio de luz branca quando incidente em uma gotícula esférica de água imersa no ar.



Fonte: Autor, adaptado de YOUNG; FREEDMAN, 2008.

Ao passar do ar para a água, a luz branca sofre refração. Conforme vimos na expressão (3), a lei de Snell-Descartes estabelece uma relação entre os índices de

refração dos meios em que a luz se propaga e os senos dos ângulos de incidência e refração.

Todavia, a incidência sobre a gota corresponde à luz branca propagando-se no ar. Ela é a mesma tanto para o raio refratado vermelho, quanto para o raio refratado violeta. Desta forma, podemos chamar o termo à esquerda da igualdade da equação (3) de uma constante  $k$ :

$$k = n_B \text{sen}(r') \quad (10)$$

Para o momento da refração, por ocorrer dispersão, os raios refratados serão analisados separadamente. A justificativa para isso é que, como vimos na expressão (9), um meio tem diferente índice de refração a depender do comprimento de onda da luz. Tão logo, o desvio também não será o mesmo.

Combinando as expressões (9) e (10) para o raio vermelho:

$$k = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{vermelho}}} \text{sen}(r'_{\text{vermelho}}) \quad (11)$$

E para o raio violeta:

$$k = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{violeta}}} \text{sen}(r'_{\text{violeta}}) \quad (12)$$

Como a constante  $k$  é a mesma para as expressões (11) e (12), por se tratar da luz branca incidente sobre a gota, podemos escrever que:

E:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{vermelho}}} \text{sen}(r'_{\text{vermelho}}) = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{violeta}}} \text{sen}(r'_{\text{violeta}}) \quad (13)$$

Rearranjando a expressão (13):

$$\frac{\lambda_{\text{vermelho}}}{\lambda_{\text{violeta}}} = \frac{\text{sen}(r'_{\text{vermelho}})}{\text{sen}(r'_{\text{violeta}})} \quad (14)$$

Somos sabedores que o comprimento de onda da luz vermelha é maior do que o comprimento de onda para o violeta. Ou seja, o quociente  $\frac{\lambda_{\text{vermelho}}}{\lambda_{\text{violeta}}}$  é maior que

1. Logo,

$$r'_{\text{vermelho}} > r'_{\text{violeta}} \quad (15)$$

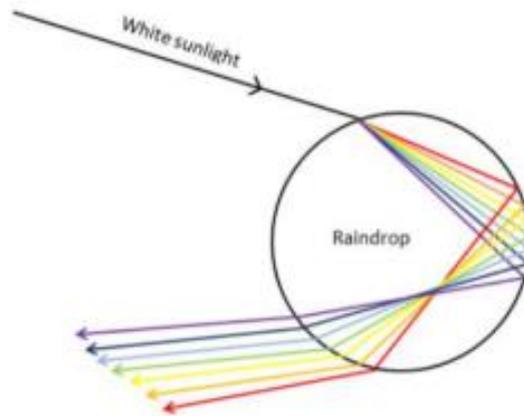
A conclusão assinalada como (15) é a confirmação do exposto na figura 12: ao adentrar a gota, o raio de luz vermelha sofre maior desvio com relação à reta normal do que o raio violeta (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Os raios luminosos continuam seu caminho dentro da gota, chegando ao ponto B, onde refração e reflexão ocorrem simultaneamente. Como já externamos, a análise é bastante semelhante com o feixe de luz monocromática verde. A imagem 12 mostra o comportamento dos referidos raios no interior da gotícula até chegarem ao ponto C. Nele, parte da luz será transmitida por refração para o ar novamente (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

O ângulo com o qual os raios emergentes da gota formam com a horizontal depende do comprimento de onda da luz, isto é, de sua cor. O vermelho, por exemplo, deve fazer algo em torno de  $42,5^\circ$  com a superfície plana e horizontal, enquanto que o violeta forma ângulos levemente menores, de aproximadamente  $40,8^\circ$  com a mesma referência (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

A imagem 13 nos mostra não apenas os raios de luz que representam os extremos do espectro visível, mas também as outras cores do arco-íris (MENEZES *et al*, 2019).

*Figura 13: Representação esquemática análoga à Fig. 12, com todas as cores do espectro visível.*

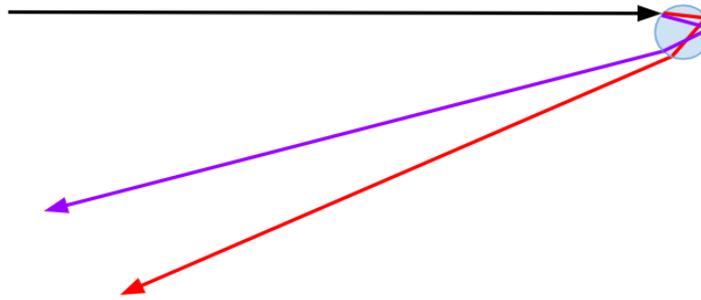


Fonte: FLYNN (2016).

De maneira mais simplificada, podemos representar a gota de chuva da seguinte forma:

*Figura 14: Simplificação da Fig. 12.*

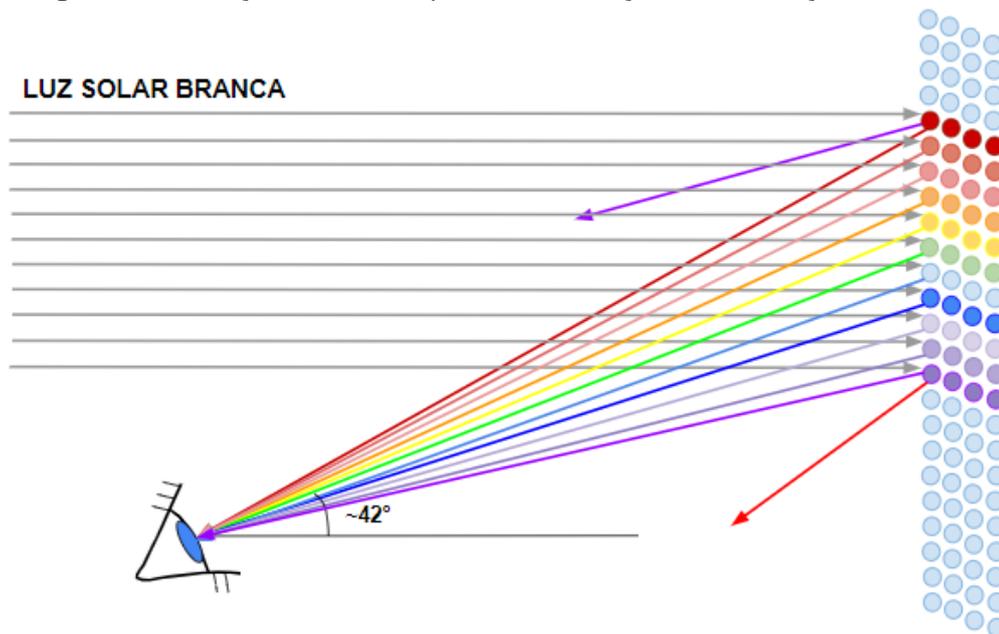
## LUZ BRANCA



Fonte: Autor, adaptado de YOUNG; FREEDMAN, 2008.

Contudo, a visualização do arco-íris não depende apenas de uma gota de chuva em um dia de sol. Muito pelo contrário: para a formação do arco, tem-se a necessidade de que diversas gotículas estejam passando simultaneamente pelo mesmo processo descrito anteriormente. Observe a representação simplificada 15. Temos uma fileira de gotas de chuva que recebem a luz solar e um observador posicionado no plano horizontal.

Figura 15: Formação do arco-íris primário e condição de observação do mesmo.



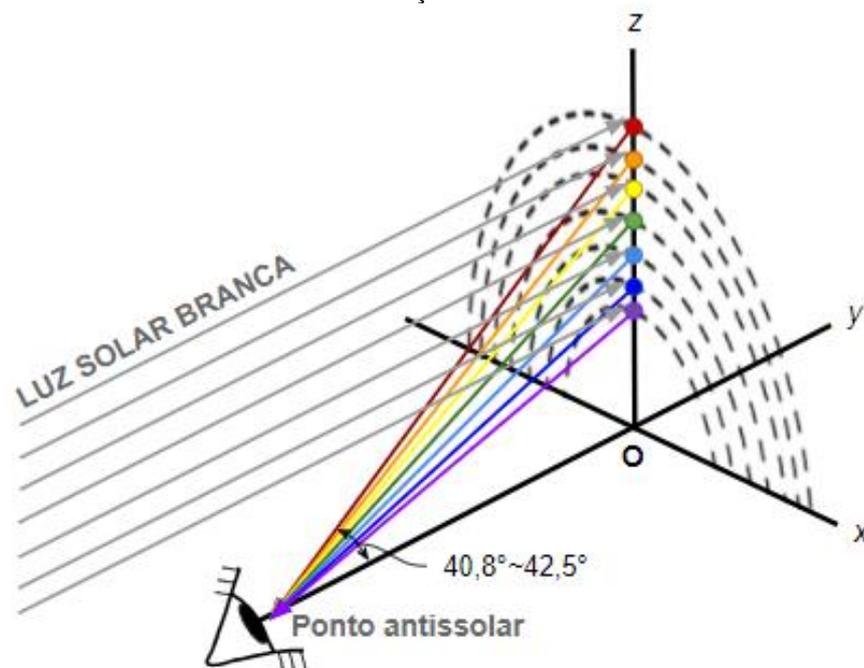
Fonte: Autor, adaptado de YOUNG; FREEDMAN, 2008.

As primeiras gotas de cima para baixo, pela configuração da ilustração, serão percebidas pelo observador como vermelhas, tendo em vista que os raios de luz que chegam ao olho do indivíduo são relativos a esta cor. As últimas gotas, por sua vez, mais inferiores, emanam para os olhos do observador a cor violeta. Por sua vez, serão

percebidas desta forma. Nas gotas intermediárias, a percepção é das outras cores do espectro visível, que estarão arranjadas na forma de um arco (NUSSENZVEIG, 1977).

Os olhos do observador funcionam como o vértice de um cone, como podemos observar na imagem 16. Este ponto é conhecido pela literatura como ponto antissolar (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Figura 16: Formação do arco-íris primário, com observador posicionado no ponto antissolar e formação do cone.



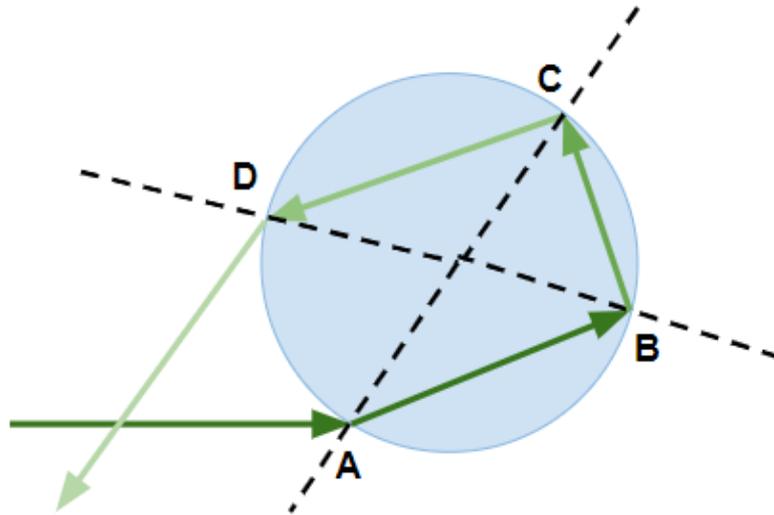
Fonte: Autor, adaptado de YOUNG; FREEDMAN, 2008.

É conveniente fazer uma ressalva. A trajetória da luz no interior da gota não termina no ponto C, com os raios emergentes formando o arco-íris tal como estamos acostumados. Neste ponto, ocorrem simultaneamente a refração e a reflexão, o que significa que o caminho dos feixes continua, mesmo que com menor intensidade luminosa.

No ponto D, como nos indica a imagem 17, ocorrerá a transmissão desta luz mais fraca para fora da gota, formando um segundo arco-íris. O arco-íris secundário apresenta as cores invertidas, é menos intenso e é resultado da segunda reflexão no interior da gotícula (MENEZES *et al*, 2019). O ângulo formado pelos os raios

emergentes da gota com a horizontal para a formação deste arco-íris está em um intervalo entre  $50,1^\circ$  e  $53,2^\circ$ , aproximadamente (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

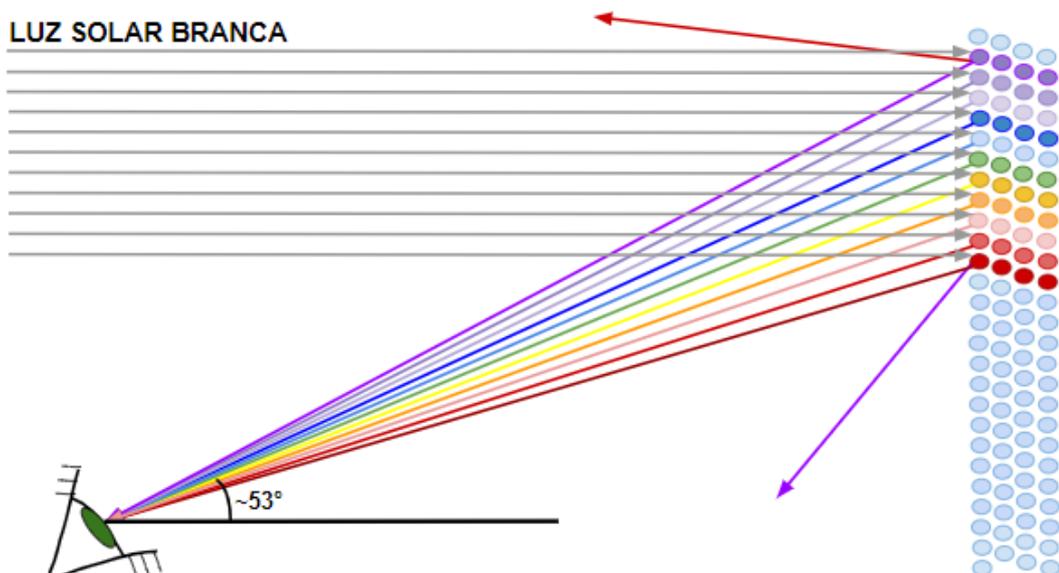
Figura 17: Caminho do raio de luz dentro da gotícula para a formação do arco-íris secundário.



Fonte: Autor, adaptado de YOUNG; FREEDMAN, 2008.

A imagem 18 mostra o ângulo formado com a horizontal necessário para a visualização do arco-íris secundário (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Figura 18: Formação do arco-íris secundário e condição de observação do mesmo.



Fonte: Autor, adaptado de NUSSENZVEIG, 1977.

Além de D, existem outros pontos onde ocorrerá a reflexão da luz para dentro da gota, o que resulta na formação de arco-íris terciários, quaternários e etc. Contudo,

em virtude da redução da intensidade da luz em cada um destes pontos, a visibilidade destes é bastante prejudicada (MENEZES *et al*, 2019).

### 3 REFERENCIAL DE ENSINO

Nesta seção, nos dedicamos a fazer uma revisão bibliográfica acerca da necessidade da adoção de Ambientes de Aprendizagem em substituição à atual dinâmica de sala de aula. Nestes espaços, encontramos a oportunidade de aproveitar conceitos relacionados à perspectiva da aprendizagem por descoberta de Jerome S. Bruner e da teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior, proposta por Gerson K. Cruz.

#### 3.1 O AMBIENTE DE APRENDIZAGEM

A forma como a escola está estruturada na atualidade desfavorece que os aprendizes tenham uma real experiência educativa. O formato padrão, em que o professor se coloca à frente da lousa, sobre o tablado, com os alunos escutando passivamente está longe de ser o formato ideal.

Segundo Gautério e Rodrigues:

A lógica burocrática aplicada às escolas afeta diretamente os estabelecimentos, com sua estrutura padrão, reproduzível em qualquer região que regido pelo mesmo sistema educativo (Thurler, 2001). Essa lógica é fortemente interiorizada pelos sujeitos, de modo a influenciar a maneira como percebem seu papel; eles não imaginam poder ter vivências diferenciadas no espaço escolar e que o mundo em que vivemos é construído a partir de nossas percepções, as quais estão diretamente ligadas a nossa estrutura. (GAUTÉRIO; RODRIGUES, 2013, p. 607).

Isto significa que se o desejo da escola é um aluno crítico, autônomo, com a capacidade de resolver problemas, a estrutura de sala de aula encontrada na maioria das instituições de ensino não é coerente com este objetivo. E este desejo por um aluno independente e com a capacidade de mudar o mundo a sua volta é externado nos mais variados documentos normativos da educação.

Vejamos o que diz a Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

No novo cenário mundial, reconhecer-se em seu contexto histórico e cultural, comunicar-se, ser criativo, analítico-crítico, participativo, aberto ao novo, colaborativo, resiliente, produtivo e responsável requer muito mais do que o acúmulo de informações. Requer o desenvolvimento de competências para aprender a aprender, saber lidar com a informação cada vez mais disponível, atuar com discernimento e responsabilidade nos contextos das culturas digitais,

aplicar conhecimentos para resolver problemas, ter autonomia para tomar decisões, ser proativo para identificar os dados de uma situação e buscar soluções, conviver e aprender com as diferenças e as diversidades (BRASIL, 2018, p. 14).

Jerome Bruner vai no mesmo sentido. Em artigo que versa sobre as ideias do conhecido autor, Silva e Gomes (2017, p. 24) pontuam que não desejamos alunos que apenas memorizem conceitos e definições, mas também sejam capazes de reunir informações e resolver problemas de suas vidas cotidianas fazendo uso desse conhecimento.

A Base Nacional Comum Curricular (2018, p. 547), uma vez mais, aponta a necessidade de a escola se comprometer com o que chamamos de letramento científico para que os aprendizes se tornem cidadãos capazes de encarar a vida real, compreendendo e atuando sobre processos e fenômenos.

Cruz (2016, p. 41) aponta no livro “A Criação do Conhecimento Real Exterior” que no atual modelo de ensino, o aprendiz, na escola, tem contato com uma informação já concebida, fechada em si mesma. Isto é, o aluno não constrói o próprio conhecimento e é forçado a se limitar em reproduzir o que o cientista fez no passado e o que o seu professor escreveu e resolveu no quadro.

Em frente a esta problemática, a substituição do modelo atual por um Ambiente de Aprendizagem parece ser uma alternativa a se considerar; nele o objetivo é que os estudantes se reúnam por compartilharem de um mesmo desejo: o de aprender. Com isso, Cruz (2018, p. 16) afirma que o espaço físico deve ser agradável o suficiente para que se gere um apego emocional dos alunos pelo processo de construção do conhecimento.

Quando nos referimos a “espaço físico agradável”, falamos de uma condição fundamental que o Ambiente de Aprendizagem deve reunir. Ainda segundo Cruz (2018, p. 16), ele deve ter a capacidade de fazer com que o aluno foque sua atenção no processo de construção do conhecimento, reduzindo a possibilidade de dispersar e desviar desse objetivo.

O compartilhamento de conhecimentos e visões de mundo entre os estudantes também é um benefício advindo da construção de um Ambiente de Aprendizagem. Para Gautério e Rodrigues (2013, p. 614), mesmo reconhecendo que o aprendizado é algo muito particular, próprio de cada indivíduo, a interação entre aqueles que estão interessados em explorar um conhecimento potencializa a compreensão dele, uma vez que há envolvimento emocional neste intercâmbio de informações.

Nesta perspectiva de exploração de alternativas oportunizada pelo Ambiente de Aprendizagem, o professor não está mais em uma posição autoritária de detentor de todo o conhecimento, enquanto os estudantes são meros espectadores. Além do ambiente favorável à aprendizagem, o problema oferecido para ser discutido pelos aprendizes tem papel fundamental no processo. É esse desafio e a forma como ele será explorado que irá alterar toda a dinâmica do evento educativo.

Isso se justifica, uma vez que

Quando oferecemos aos estudantes a oportunidade de se envolverem nas atividades de forma ativa, estamos proporcionando condições para que sintam o prazer de experienciar a aprendizagem, entendendo que a sua contribuição e esforço poderão superar o desafio proposto. Desse modo, o trabalho coletivo contribui para o desenvolvimento social, cognitivo, afetivo e relacional (GAUTÉRIO; RODRIGUES, 2013, p. 615).

Ou seja, neste contexto, o professor fornece a oportunidade para que o aluno resolva um desafio aberto, que desperte sua curiosidade e o faça percorrer um (ou vários) caminho(s) em busca da resposta. Como a citação acima muito bem pontua, os benefícios trazidos por essa abordagem são os mais diversos.

Podemos notar, a partir da revisão bibliográfica feita até aqui, que o Ambiente de Aprendizagem muito se relaciona com a perspectiva da aprendizagem por descoberta defendida por Jerome Bruner. É sobre ela que nos dedicaremos nos próximos parágrafos.

Antes, porém, vamos destinar algumas linhas para uma definição.

O construtivismo, segundo Ferreira *et al* (2015, p. 51), é um ramo das teorias de aprendizagem que foca em compreender os processos mentais que ocorrem enquanto um indivíduo está aprendendo. Uma abordagem em sala de aula que leve em conta tais processos estaria, em tese, tornando o conhecimento gerado mais resistente ao esquecimento e também mais significativo.

Contudo, quais são as condições para que um método empregado seja realmente construtivista? Seguir um passo a passo que simule o trabalho do cientista ao descobrir uma lei ou uma propriedade é ser construtivista? São questionamentos que ambicionamos responder adiante.

### 3.2 A TEORIA DA INSTRUÇÃO DE JEROME S. BRUNER

Bruner (2006, p. 51-52) descreve sua teoria de ensino como prescritiva e normativa. O autor faz isso em oposição às teorias que foram contemporâneas a ele, tidas como mais descritivas, uma vez que se preocupam apenas em analisar os processos envolvidos na aprendizagem. Ao oferecer critérios e regras a serem seguidos por professores, Bruner dá noção prática às contribuições sobre a gênese do conhecimento humano.

Ainda segundo ele, a “Instrução é um esforço para auxiliar ou moldar o crescimento” (BRUNER, 2006, p. 15) do aluno. Mas sobre qual crescimento Bruner se refere?

Trata-se do crescimento intelectual (ou desenvolvimento intelectual, a depender da bibliografia consultada). Este crescimento tem origem nas experiências vividas pelo aprendiz, captadas por ele através de seus sentidos e registradas em um “sistema de armazenamento”. Para Bruner (2006, p. 19), verificaremos que houve desenvolvimento intelectual quando o aprendiz é capaz de extrapolar o modelo de mundo adquirido por ele por meio dessas vivências.

Uma vez que o crescimento intelectual se inicia com as experiências particulares do indivíduo, a cultura é uma variável importante a se considerar.

A forma como acontece o processo do desenvolvimento cognitivo em muito tem haver com o contexto no qual o indivíduo está inserido. Sendo assim, a construção de valores a respeito do mundo varia de pessoa para pessoa, pois a maneira como enxergamos o mundo depende, como já dito, de nossos valores e concepções culturais. (FERREIRA *et al*, 2015, p. 53)

A citação anterior é mais uma evidência da incapacidade do atual modelo de escola de alcançar bons resultados. Uma vez que o desenvolvimento cognitivo é dependente do contexto e dos valores singulares de cada pessoa, é infrutífero tentar ensinar de maneira homogênea para turmas que são radicalmente heterogêneas.

O crescimento intelectual descrito por Bruner relaciona-se fortemente com três formas de representação: ativa, icônica e simbólica. Apenas após dominar todos estes modos de representar um conhecimento que teremos marcas concretas de que houve realmente desenvolvimento cognitivo. Bruner (2006, p. 25, p. 56) salienta que qualquer domínio de conhecimento pode ser representado por estes três modos.

Em seu livro “Teorias de Aprendizagem”, Moreira (1999, p. 83) afirma que para Bruner, a representação ativa é aquela em que o indivíduo manipula o ambiente em que vive por meio da ação concreta, direta. Este é um conceito que possui

terminologias diferentes de uma bibliografia para a outra: é também conhecida como representação enativa, ou então, ordenativa.

A representação ativa, segundo os estudos de Bruner (2006, p. 24-25), envolve-se mais com o aprendizado de respostas a estímulos e a criação de hábitos. Crianças pequenas, ainda em idade pré-escolar, resumem suas representações do mundo exterior desta maneira, sendo incapazes de internalizar elementos pictográficos.

Já a icônica se caracteriza por interiorizar dados que na forma de representação ativa eram exclusivamente concretos. Moreira (1999, p. 83-84) informa que, segundo a teoria de Bruner, ao superar esta etapa, o indivíduo não precisa mais manipular o ambiente à sua volta e consegue resolver problemas a partir de operações mentais.

Segundo Bruner (2006, p. 24), este modo de representação “depende da organização sensorial e visual, além de resumir as imagens”. Uma das vantagens com relação à representação ativa é que o aprendiz é capaz de reconhecer padrões. Com isso, a economia propiciada pela organização perceptiva característica deste sistema é um fator crucial na seleção de variáveis importantes para a resolução de um problema, por exemplo.

O último modo de representação é considerado como sendo o auge da capacidade de abstração do indivíduo. Para Moreira (1999, p. 84), nesta fase o aprendiz é capaz de fazer uso de símbolos e códigos particulares daquele conhecimento. Trata-se da representação simbólica.

Uma vantagem do domínio da representação simbólica, segundo Bruner (2006, p. 25) é a compatibilidade do sistema simbólico adotado. O autor exemplifica que em uma simples expressão da física como  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , há uma condensação muito grande de informações. Sabemos que aqueles que dominarem bem a linguagem própria da disciplina em questão são capazes de explorar a enorme gama de possibilidades que a equação nos fornece.

Com relação a isso, Moreira (1999, p. 88) afirma que:

A economia na representação de um domínio de conhecimento está relacionada com a quantidade de informação a ser conservada na mente, e a ser processada para resolver algum problema, ou entender novas proposições.

Ou seja, a representação simbólica, por fazer uso de códigos, é o modo mais econômico de armazenar uma grande quantidade de informações na mente sem o esforço da manipulação direta dos conhecimentos ou a recordação de imagens relativas a eles.

Bruner (2006, p. 29) afirma que “A linguagem oferece meios de libertação da aparência imediata como base única para o julgamento”. Isso significa que, enquanto a representação icônica diz respeito apenas à análise da realidade presente, ao dominar a simbologia e os códigos, o aprendiz desenvolve a capacidade de explorar alternativas que não somente aquelas que saltam aos olhos inicialmente.

Podemos observar, a partir do que já foi descrito sobre as formas de representação trazidas pela teoria de ensino de Bruner, que ao ter contato com um conhecimento por meio da experiência, o ser humano progride de fase em fase até alcançar seu crescimento intelectual. Na primeira, ativa, suas possibilidades passavam apenas pela manipulação direta do objeto de estudo. Em seguida, o indivíduo desenvolve independência em relação a este contato e consegue operar mentalmente. Por fim, na representação simbólica, ele é capaz de usar o sistema de códigos e extrapolar para além da realidade imediata.

Para demonstrar a importância do domínio da terceira forma de representação, Bruner (2006, p. 19) afirma que “O crescimento intelectual envolve a capacidade crescente de dizer para si mesmo e para os outros, por meio de palavras ou símbolos, o que foi feito ou será realizado”.

Ferreira *et al* (2015, p. 49) dedica um parágrafo de seu livro sobre teorias de aprendizagem para exemplificar o progresso entre as formas de representação de uma bicicleta para uma criança. Reproduzimos este trecho abaixo:

Uma forma simples de explicar como funcionam os tipos de representação do conhecimento é fazendo uma analogia como, por exemplo, uma bicicleta. Para ensinar a uma criança o que é uma bicicleta, primeiro mostramos a ela tal objeto, fazendo com que a criança tenha contato, que aprenda pelo concreto, guardando esta experiência em sua memória. Essa seria a representação enativa do conhecimento. A partir daí, todas as vezes que a palavra "bicicleta" for pronunciada próxima à criança, esta fará uma imagem mental de tal objeto, pois já sabe como ele é; momento em que ocorre a representação icônica. Com o desenvolvimento, a criança será capaz de reconhecer o objeto por meio de símbolos, como a palavra "bicicleta". Esta é a representação simbólica do conhecimento proposta por Bruner. (FERREIRA et al, 2015, p. 49)

Fica bastante evidente a possibilidade aberta pela teoria do desenvolvimento intelectual de Bruner no sentido de garantir fundamentação às aulas experimentais de física. O ensino deve oferecer a possibilidade de o aluno progredir de um modo de representação ao outro até atingir plenas capacidades de abstração para explorar um problema.

Em seu livro “Sobre a Teoria da Instrução”, Bruner lança as bases do que conhecemos como aprendizagem por descoberta. Nesta obra, o autor reúne características indispensáveis que o trabalho em sala de aula deve conter para que o real aprendizado seja alcançado.

O que citamos acima como “real aprendizado” é aquele já definido no início desta seção “Referencial de Ensino”. O aluno que aprendeu não é somente um erudito, detentor de grandes quantidades de informação, mas sim aquele que sabe o que fazer com ela. Utiliza o conhecimento desenvolvido para gerar hipóteses que resolvam os problemas de sua vida cotidiana e da comunidade. É isso o que é defendido por Bruner e também pela Base Nacional Comum Curricular vigente no Brasil.

O processo de instrução apregoado por Bruner (2006, p. 81) leva em conta que o saber é um processo, não um produto. Isso abre margem para que a aprendizagem por descoberta seja incorporada ao dia-a-dia das salas de aula. Para o autor, a instrução visa ajustar condições para fazer com que o aprendiz se reconheça como parte do processo de aquisição do conhecimento tal como o cientista que explora um fenômeno ao rearranjar informações para buscar um novo entendimento (2008, p. 88).

Cientistas, a rigor, trabalham diariamente com a resolução de problemas. Entram em contato com fenômenos desconhecidos cujo primeiro questionamento pertinente relacionado a eles é “por que isso acontece?”. Semelhante a isso, na aprendizagem por descoberta, o desafio oferecido aos estudantes funciona como elemento inicial do processo de aprendizagem. Segundo Bruner (2008, p. 102), são as resoluções de problemas abertos, que exigem exploração de várias alternativas antes de se chegar à resposta, que municiam os alunos de experiências fundamentais para o desenvolvimento da capacidade de abstração.

E como já vimos, é apenas com esta capacidade de abstração bem desenvolvida é que outros problemas poderão ser resolvidos.

Para Bruner:

A ênfase na descoberta, além disso, auxilia a criança a aprender uma variedade de formas para resolver problemas e transformar a informação para uma melhor utilização, ou seja, ajuda a aprender como lidar com a tarefa de aprender. (2008, p. 92).

A teoria instrucional de Bruner, normativa e prescritiva como se propõe, elenca quatro características muito importantes que o processo de ensino deve ter e que guiam o trabalho do professor durante o evento educativo. São elas: predisposições, estrutura, sequência e reforçamento. Vamos explorar cada um destes atributos nos próximos parágrafos.

Quando nos referimos a predisposições, estamos pensando na motivação do aluno para a exploração de alternativas que resolvam o problema proposto. E para garantir que o aprendiz tenha motivação durante todo o processo de construção do conhecimento, o professor deve garantir, como pressuposto básico, uma boa relação entre ele e o estudante. “As relações entre quem ensina e quem aprende nunca são indiferentes em seu efeito sobre o aprendiz” (BRUNER, 2006, p. 54).

O pesquisador, em seu trabalho no laboratório, frequentemente conhece o resultado final do fenômeno que está explorando. Essa característica não é diferente na perspectiva da aprendizagem por descoberta.

Segundo Bruner (2006, p. 55):

Para a exploração ter direção, em resumo, o objetivo da tarefa precisa ser conhecido de forma aproximada, e o exame das alternativas precisa produzir informação de onde se está com respeito a este objetivo.

Isto é, o professor deve considerar que o direcionamento das atividades em torno da exploração de alternativas deve ser feito visando um objetivo conhecido (ou parcialmente conhecido). Caso contrário, não haveria como emitir hipóteses. Isso serve, também, como um subterfúgio para que as atividades desenvolvidas em sala de aula não sejam bagunçadas o suficiente para desviar o aprendiz daquele problema que ele está resolvendo.

É comum observar, nas mais variadas bibliografias consultadas, que Bruner (2006, p. 55) é enfático em dizer que o problema explorado pelo aluno deve possuir um nível ótimo de incerteza. Isso significa que ele não pode ser muito fácil a ponto de ser trivial e exigir pouco do aprendiz, tampouco muito complexo que inviabilize sua resolução e gere angústia nele.

A estrutura dos conteúdos a serem ofertados para o aluno também é uma característica da teoria da instrução em que o professor deve dedicar atenção. Sua seleção pelo docente é fundamental na delimitação dos conhecimentos a serem trabalhados pelo aprendiz durante sua exploração.

Isso pois,

o mérito da estrutura depende do seu poder para *simplificar a informação, gerar novas proposições e aumentar a manipulabilidade do corpo de conhecimento*. A estrutura precisa sempre estar relacionada à situação social e ao dom do aprendiz (BRUNER, 2006, p. 53).

O terceiro atributo é fortemente relacionado com a estrutura: trata-se da sequência. Silva e Gomes (2017, p. 20) afirmam que a sequência com que o conhecimento chega até o aluno durante a exploração das hipóteses é importante uma vez que impacta a compreensão do conteúdo. Não parece ser produtivo começar a explanação no nível das representações simbólicas se o aluno tampouco domina os modos ordenativo e icônico, por exemplo.

Com relação ao reforço, Bruner procura priorizar as recompensas intrínsecas em detrimento das extrínsecas. Isto é, “o grau do desejo por competência passa a controlar o comportamento em um nível em que o papel do reforço ou a “recompensa externa” diminui na moldagem do comportamento” (BRUNER, 2008, p. 97). Ou seja, o maior prêmio para o estudante deve ser reconhecer sua capacidade em resolver um problema (aprender), em vez de congratulações e agrados materiais.

A aprendizagem por descoberta, também conhecida como modelo hipotético, pode assim ser chamada pois é baseada na exploração de alternativas por parte dos estudantes. Por si só, isso já é uma grande diferença com relação à passividade dos alunos encontrada em sala de aula na atualidade, conforme nos indica Bruner (2008, p. 89):

No modelo hipotético, porém, o professor e o estudante estão em uma posição mais cooperativa com respeito ao que, em linguística, se poderia denominar “decisões do orador”. O estudante não é um ouvinte colado ao banco, mas toma parte na formulação e às vezes atua no papel principal. Ele ficará ciente das alternativas e pode até expressar uma atitude de “e se” em relação a elas.

A citação acima nos chama para uma reflexão interessante: quando o professor é orador e o aluno espectador, o segundo não tem consciência das decisões tomadas pelo primeiro para estruturar e sequenciar o conteúdo. Nem menos sabe quais

hipóteses o docente teve de conceber e explorar para resolver um exercício. Por outro lado, quando a aprendizagem por descoberta é adotada com seriedade, seguindo todos os pressupostos de Bruner, o aprendiz passa a ter caminho livre para fazer seus questionamentos e propor hipóteses que possivelmente encaminhem a resolução do desafio.

Entretanto, devemos fazer algumas considerações a respeito das hipóteses emitidas pelos alunos.

As crianças que estão inundadas com informações desorganizadas proveniente de hipóteses sem conexão se tornam desencorajadas e confusas mais cedo do que as crianças que mostram uma certa astúcia em sua estratégia de reunir informação, que sentem que o valor da informação não está em simplesmente obtê-la, mas em ser capaz de manejá-la (BRUNER, 2008, p. 91).

Segundo a citação acima, as alternativas propostas para a resolução do problema têm de ser coerentes. Elas devem considerar as características do evento explorado, ter conexão umas com as outras e devem propiciar com que os resultados advindos de sua testagem contribuam com evidências que venham a compor o corpo de conhecimentos do estudante.

Bruner (2008, p. 91) afirma que não há outra maneira de emitir melhores hipóteses e mais organizadas, senão treinando a resolução de problemas.

Em meio a tudo isso, o professor tem papel fundamental. Como já vimos, é sua função ajustar o evento educativo de modo que contemple as quatro características previstas pela teoria da instrução de Bruner. O objetivo de tudo isso é, conforme Silva e Gomes (2017, p. 21-22), tornar o aluno independente do auxílio contínuo do tutor, autossuficiente e capaz de adquirir domínio sobre qualquer conteúdo.

Para Bruner, “O bom professor é aquele que consegue projetar exercícios, ou melhor, oferecer experiências que necessitam de representação” (2008, p. 104). Tão logo o aluno esteja inserido no contexto da aprendizagem por descoberta e seja corretamente instruído pelo docente, ele irá evoluir suas formas de representação e alcançará o crescimento cognitivo almejado.

Tornaremos a falar sobre a função do professor mais adiante.

A hipótese ocupa posição privilegiada nas proposições de ensino de Bruner. Todavia, na teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior (C.C.R.E.) de Cruz, sua importância também é destacada.

### 3.3 A TEORIA C.C.R.E. DE GERSON K. CRUZ

Com relação a esta teoria, temos de considerar três tipos de conhecimentos: conhecimento do inconsciente, conhecimento da mente e conhecimento real exterior. Cruz (2016, p. 66) afirma que o indivíduo em contato com o mundo exterior abastece seu inconsciente com uma imensa quantidade de informações. Estas informações chegam até ele por meio de seus cinco sentidos ou pela ação motora e lá ficam armazenadas permanentemente.

O conhecimento armazenado de maneira real (que pode ser recuperado) no inconsciente do ser humano só poderá ser utilizado se for transportado para a mente, tornando-se lá um conhecimento virtual e temporário. Para Cruz (2016, p. 66), um procedimento de busca é aquilo que faz o resgate da informação preservada no inconsciente e traz para a mente.

Mas o que são estes procedimentos de busca? Segundo o autor da teoria:

Normalmente, nesses casos, o procedimento de busca se dá por meio de uma pergunta simples. Se o procedimento de busca for adequado, a informação chegará à mente de forma ordenada; caso contrário, a informação transmitida será desconexa (CRUZ, 2016, p. 67).

Da citação anterior, podemos depreender a importância do procedimento de busca no contexto desta teoria. Quando o indivíduo pensa em alguma coisa, ele ativa seus mecanismos de busca para trazer uma informação do inconsciente para a mente. Contudo, a informação recuperada só será correta se o procedimento de busca for bem feito, isto é, se o questionamento feito pela mente ao inconsciente for eficiente.

Acabou de ser descrito o ato de pensar (CRUZ, 2016, p. 44).

Para Cruz (2016, p. 61), o conhecimento momentaneamente registrado na mente será racional e poderá ser utilizado para, por exemplo, responder a algum problema imediato.

É nesse momento em que as hipóteses aparecem com força na teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior.

Temos um problema para solucionar e vamos em busca de informações que possam nos trazer uma solução. Nossa mente passa a dialogar com o inconsciente e tenta obter uma resposta para o problema. Essa informação pode ser conclusiva ou próxima a solução. Tudo irá depender do nível e do tipo de informação que você já possui armazenada em seu inconsciente (CRUZ, 2016, p. 144).

Defrontado com um desafio, o indivíduo ativa o diálogo entre a mente e o inconsciente, buscando no segundo o conhecimento relevante para solucioná-lo. Basicamente, o cérebro passa a emitir hipóteses fazendo uso das informações armazenadas permanentemente no inconsciente com o objetivo de resolver o problema.

Mas uma boa hipótese só será concebida se o indivíduo conhecer bem o seu objeto de estudo. Explorá-lo é fundamental, tendo em vista que “Boas hipóteses são criadas se temos uma boa descrição do que está sendo estudado” (CRUZ, 2016, p. 140).

O leitor já deve perceber a importante semelhança entre a teoria do crescimento intelectual de Bruner e a teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior. Quando o assunto é a hipótese, ambas se complementam para ressaltar a importância da exploração de alternativas no contexto da aprendizagem por descoberta.

Uma boa hipótese é aquela que recupera o conhecimento necessário para se resolver um problema (Cruz), mas isso só será possível se o indivíduo tiver uma boa descrição do objeto de estudo, ou seja, domine bem todas as suas formas de representação (Bruner).

A hipótese gerada pelo indivíduo na busca de uma solução é tão importante que Cruz (2016, p. 140) a apelidou de o “procedimento de busca que mudou a humanidade”.

Ademais, tanto a aprendizagem por descoberta quanto a ativação dos procedimentos de busca têm início parecido. Para Cruz (2016, p. 63), é a necessidade quem cria as condições necessárias para a concepção de um procedimento de busca. Em outras palavras, o indivíduo deve ser desafiado por um problema para se ver incluído no processo de aprendizagem.

Podemos notar que tanto o conhecimento inconsciente quanto o conhecimento da mente se caracterizam por serem individuais. Contudo, ainda existe um terceiro tipo de conhecimento previsto pela teoria de Cruz: trata-se do Real Exterior. Este sim, é coletivo.

o conhecimento racional é gerado, elaborado e finalizado numa conversação entre a mente e o inconsciente. Somente o resultado final é registrado temporal e virtualmente como conhecimento da mente. Esse mesmo registro é feito de forma real e permanente no inconsciente. Portanto, a racionalidade não pode ser compartilhada,

ela é individual, criada numa conversação entre a mente e o inconsciente de cada indivíduo. O que pode ser compartilhado são os resultados dessa racionalidade quando este resultado é externado, ou seja, por meio da ação motora (CRUZ, 2016, p. 62).

Qualquer produto construído pelo aprendiz é uma forma de registrar seu conhecimento de maneira real, permanente e coletiva. Para Cruz (2016, p. 69), a gravação de um vídeo, o desenvolvimento de uma ferramenta ou a própria escrita podem ser formas de se criar este terceiro tipo de conhecimento. E muitas são as vantagens de se fazer esse registro exterior.

Caso o conhecimento consciente já finalizado não seja registrado na forma de conhecimento real, o que irá ocorrer? Novas informações serão injetadas pelo inconsciente de forma diversificada em nossa mente, e o conhecimento consciente que havia sido criado poderá ser perdido (CRUZ, 2016, p. 166).

Isto pode ser exemplificado facilmente pela situação cotidiana da desatenção. Durante o desenvolvimento de uma atividade, o aluno tem seus sentidos regularmente requisitados pelos mais variados fenômenos que ocorrem em seu entorno. Um lápis que caia no chão é motivo suficiente para que o inconsciente do aprendiz seja carregado com novas informações. Elas podem transitar quase instantaneamente para a mente, ocupando o espaço do conhecimento racional necessário para o desenvolvimento de uma tarefa importante, dificultando-a. O registro exterior em papel é uma possibilidade para evitar que aquele conhecimento realmente importante se dissipe.

No contexto da sala de aula, o professor, segundo Cruz (2016, p. 153) tem um papel importante que vai no sentido de orientar o estudante, direcionando o aprendiz em busca de seu objetivo. Ele é o guia do Ambiente de Aprendizagem.

o professor-guia, conhecedor do desenvolvimento completo da situação/experimento, detecta a dúvida do aprendiz e pode passar a direcionar o aprendiz na investigação. Ressaltemos que ele não faz intermediação entre o aprendiz e o conhecimento. O professor guia apenas implementa um possível caminho que pode levar o aprendiz a auto-solução de sua necessidade (CRUZ, 2019, p. 22).

Traçando um paralelo com a teoria da instrução de Bruner, é o professor quem oferece a oportunidade de o aluno explorar alternativas com vistas a resolver um problema desafiador. Ele direciona as atividades de modo que o estudo não seja angustiante e potencializa, através de suas ações, a capacidade do aprendiz-pesquisador de coletar e manejar evidências que o permitam alcançar seus objetivos.

### 3.4 SÍNDROME DA DEFASAGEM E O REAL CONSTRUTIVISMO

A revisão bibliográfica acima teve por objetivo não só identificar um problema, como também propor uma solução com fundamento teórico. Ainda pensando em termos da teoria de Cruz, o modelo de escola atual é mais uma vez colocado em dúvida quando pensamos no que o autor chama de síndrome da defasagem.

Cruz (2016, p. 80) explica em seu livro que, uma vez que o tempo de processamento de informações - isto é, a realização do procedimento de busca da mente no inconsciente - é diferente de pessoa para pessoa, é impossível continuar insistindo no modelo passivo. O docente, mais preparado, põe para atuarem seus mecanismos de busca muito mais rapidamente do que um aprendiz que tem contato com o conteúdo pela primeira vez. O resultado disso é que o aluno não aprende realmente a matéria, mas faz o suficiente para reproduzi-la em provas e listas de exercícios.

É nesse contexto que transformar as salas de aula em Ambientes de Aprendizagem é uma boa alternativa. Para Gautério e Rodrigues (2013, p. 609), são nesses espaços de interação social que o conteúdo escolar é ressignificado. Ali, os conhecimentos ganham novas formas de representação que têm origem na particularidade dos indivíduos que fazem parte do processo.

Na mesma esteira disso, inserido em uma abordagem de aprendizagem por descoberta de Bruner,

o indivíduo, ao se desenvolver, deve adquirir meios de representar o que ocorre no seu ambiente. Deve ser capaz de conservar em um modelo a experiência decorrente da estimulação do meio, e também de recuperar a informação por meio desse mesmo modelo (MOREIRA, 1999, p. 83).

Estes modelos serão melhores à medida que a pessoa dominar bem as três formas de representação - ativa, icônica e simbólica - e, desta forma, alcançará o crescimento intelectual desejado pela escola.

Segundo Bruner (2008, p. 104), as condições básicas para a descoberta são a manipulação e a representação do mundo. Para descobrir, é necessário explorar alternativas, e para bem explorar estas alternativas, é preciso saber representar o fenômeno, conhecê-lo. A emissão destas hipóteses tem função vital tanto para a teoria da instrução quanto para a teoria da criação do conhecimento real exterior.

Ao final da subseção 3.1, levantamos um questionamento acerca da linha construtivista. Uma das perguntas feitas era “Seguir um passo a passo que simule o trabalho do cientista ao descobrir uma lei ou uma propriedade é ser cognitivista?”. Após a leitura deste Referencial de Ensino, podemos concluir, sem dúvidas, que a resposta é não.

Ser construtivista não é repetir, passo a passo, o trabalho do cientista. Roteiros podem ser encarados como “reconstrutivistas”, mas não como construtivistas, como nos alerta Cruz (2016, p. 153). Isto é, não aprendemos nada reproduzindo as hipóteses de outras pessoas.

Para explorar alternativas, em um primeiro momento, o indivíduo deve saber elencar tais opções de investigação. Mas para que isso seja possível, são eles mesmos que devem dominar a forma de representar seu objeto de estudo. Esta é uma preocupação que o professor deve ter sempre: a missão de construir o conhecimento e aprender via descoberta é exclusivamente do aluno.

É com estes fundamentos bem estabelecidos que o produto proposto e testado nas próximas seções se baseia.

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 MONTAGEM E APLICAÇÃO DO MATERIAL EM SALA DE AULA

O objetivo desta seção é informar ao leitor a forma como é realizada a montagem do aparato experimental e apresentar um conjunto de etapas que permitam sua aplicação em sala de aula. Estas etapas foram elaboradas com base na Teoria da Instrução, de Jerome Bruner, sendo escolhidas e sequenciadas de acordo com a pretensa evolução da capacidade de representação dos conhecimentos estudados nesta unidade didática por parte dos estudantes.

Além disso, as fases pelas quais os estudantes irão passar devem oportunizar a predisposição para a exploração de alternativas, a emissão de hipóteses para a resolução de problemas e o auto-reforçamento.

São previstas nove etapas, divididas em 15 aulas. É necessário ressaltar que, para prosseguir adiante, cada uma destas fases deve ser plenamente superada pelos estudantes. Essa obrigatoriedade vem em virtude de que não queremos “saltar” sobre nenhum modo de representação, seja ele operativo, icônico ou simbólico.

Antes da aplicação das atividades, destaca-se a importância de se preparar o ambiente de aprendizagem. Uma vez que as práticas serão feitas em grupos (de, no máximo, seis estudantes), devem-se organizar as mesas de trabalho, munindo-as com um conjunto de régua, lápis, transferidores, canetinhas e folhas de papel.

#### 4.1.1 Primeira etapa

Para este primeiro encontro, em que será apresentado o projeto e realizada a atividade inicial, sugerimos a utilização de duas aulas.

Tudo tem início com a apresentação da proposta para os alunos, explicando para eles a respeito da instalação de um ambiente de aprendizagem que vise não apenas aprender sobre o foco do estudo (o arco-íris), mas também o desenvolvimento de outras competências e habilidades.

O professor apresenta a estrutura dos fascículos, comunicando os estudantes que, a cada nova etapa, cada indivíduo receberá um capítulo com teorias, atividades e roteiros de práticas experimentais. Estes capítulos deverão ser armazenados em uma pasta do tipo “L” para serem consultados com o decorrer da aplicação do produto.

Após um tempo para que os estudantes tirem suas dúvidas a respeito da intencionalidade do projeto e de como as aulas irão transcorrer, o docente entrega o fascículo Parte 01 para cada aluno. Isto encerra a etapa de preparação.

Logo neste primeiro conjunto de aulas, os estudantes serão convidados a analisar três imagens e emitir respostas sobre cada uma delas. Estas três imagens estão presentes na Atividade I, da parte 01 e podem ser encontradas nas páginas do fascículo. Caso queira, o docente pode usar o projetor multimídia para projetar as mesmas imagens em uma tela.

Os *slides* presentes no apêndice IV do produto educacional contemplam estas figuras.

A imagem 01 traz um rodo de piscina parcialmente submerso e, por este motivo, aparentemente quebrado. Para ela, os alunos terão de descrever o que observam e tentar, a partir de suas vivências, explicar o porquê desta “ilusão de óptica”.

Já a imagem 02 representa um prisma que recebe luz branca e emana um feixe colorido. Desta vez, os estudantes terão apenas que descrever o que estão visualizando.

A imagem 03, por sua vez, traz o objeto de estudo de nosso material instrucional: o arco-íris. Nesta figura, não se observa apenas um arco, mas dois: enquanto o interno é mais intenso, o externo é mais “apagado” e apresenta a sequência de cores invertida. Os alunos serão chamados a descrever em detalhes o que estão observando e elaborar hipóteses que expliquem o aparecimento deste fenômeno. É neste momento em que a pergunta desafiadora que guia todo o nosso estudo aparece.

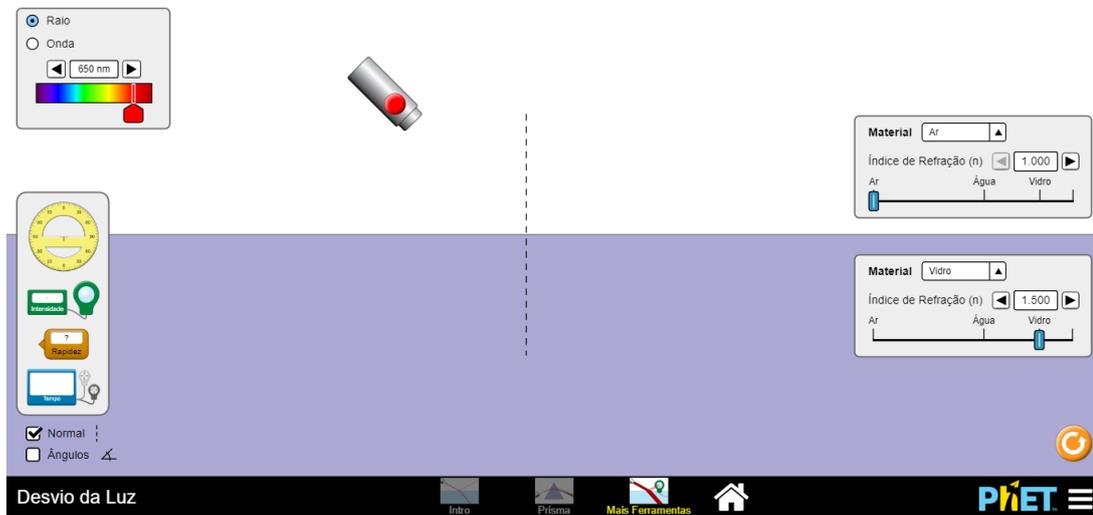
Após esta primeira observação, os estudantes devem responder ao “Refleta & Responda”, que busca fazer com que os alunos reconheçam algumas semelhanças entre as imagens.

Recomendamos o tempo de cinco minutos para que seja feita a análise de cada uma das imagens e a escrita das respostas.

A Atividade II está voltada para o uso de um simulador computacional. Caso haja a disponibilidade de uma sala de informática com acesso à internet, ela deve ser utilizada. Uma vez que o simulador pode ser acessado em *smartphones*, o uso de computadores não é um imperativo.

O simulador “Desvio da Luz”, produzido pelo PhET Colorado, deve ser acessado por pelo menos um dos integrantes de cada equipe. O *link* está disponível no fascículo Parte 01 assim como um *QR Code*, que pode ser lido com a câmera dos celulares.

Figura 19: Interface do simulador “Desvio da luz”, produzido pelo PhET da Universidade do Colorado.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulations/bending-light](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/bending-light)>

Com vistas a diferenciar os fenômenos de reflexão e refração da luz, os estudantes terão de seguir as instruções do material didático, dentre as quais se destacam: incidir um feixe luminoso na interface de separação entre o ar e o vidro, verificar os ângulos relativos a este estudo, “medir” a velocidade de propagação de cada raio de luz e “medir” a intensidade dos feixes.

Em meio a essas práticas, cada um terá de escrever respostas às perguntas disponíveis no fascículo.

Para encerrar, um “Refleta & Responda” exigirá que os alunos descrevam o fenômeno simulado, elaborando um texto que contenha algumas das informações coletadas durante a manipulação do *software*.

#### 4.1.2 Segunda etapa

Depois de uma etapa voltada, entre outros objetivos, para criar predisposições para que os alunos se empenhem em estudar o fenômeno do arco-íris e a óptica geométrica, seguimos com uma aula cujo foco é semelhante.

Nela, o fascículo levará os estudantes a ler um texto veiculado em um portal da internet. Este artigo traz informações a respeito da visualização de um “arco-íris”. Além

disso, tenta explicar de maneira acessível as condições para a formação deste fenômeno.

Antes de iniciar com a leitura, o professor deve conduzir uma síntese daquilo que foi visto no encontro anterior. O diálogo deve ser guiado pelas respostas dos alunos às questões propostas na Parte 01, visando lembrar as imagens analisadas pelos grupos e as hipóteses elaboradas por eles quando confrontados pela necessidade de explicá-las.

Em seguida, o fascículo Parte 02 será entregue para todos os estudantes, que devem anexá-lo em sua pasta. O estudo da reportagem deverá ser feito de duas maneiras: uma primeira leitura mais rápida, com vistas a identificar a estrutura do artigo e suas principais ideias; e depois, de maneira mais cadenciada, fazendo uso do marca-texto para registrar os tópicos mais relevantes.

O professor deve orientar os alunos a transcrever as passagens grifadas em seus cadernos. Essa é uma forma de evitar com que alguns indivíduos destaquem todo o artigo.

A atividade III é muito importante.

Ela é uma das primeiras oportunidades que os alunos terão de representar, a partir de um desenho, a forma como um feixe de luz proveniente do Sol se comporta quando incide sobre uma gota de chuva.

Para tanto, o fascículo traz uma ilustração incompleta, com apenas dois raios de luz: um que chega até a gota e outro que sai dela. O objetivo é fazer com que os estudantes usem as informações obtidas com a leitura do artigo de ciências para se guiar na produção do desenho.

É importante salientar que esta não é uma tarefa simples: o texto trata dos fenômenos físicos que envolvem a explicação do arco-íris de maneira superficial. Não descreve em etapas cada um dos processos e, por conta disso, o trabalho do estudante é comprometido pela ausência de informações relevantes.

Ao desenhar o que julga ser a trajetória do raio de luz dentro da gota, o aluno está emitindo uma hipótese que poderá ser testada nas etapas posteriores, podendo confirmá-la ou não.

#### 4.1.3 Terceira etapa

Neste momento da aplicação do produto, estaremos voltados a realizar um experimento que leve os alunos a concluir a respeito da relação que os fenômenos físicos citados anteriormente têm com a formação do arco-íris. Para tanto, mais uma vez o ambiente de aprendizagem deve ser montado: mesas de trabalho com folhas de papel, canetas, régua e transferidores.

Para auxiliar nos trabalhos, o professor pode escolher um aluno monitor que o ajude na organização dos grupos e na distribuição de orientações. Este estudante, entretanto, deve ser preparado previamente, recebendo o fascículo e executando o experimento antes da aula.

Com o fascículo em mãos, os grupos terão acesso à lista de materiais necessários para se montar o experimento e à sequência de procedimentos que devem ser executados. Neste momento, como será possível notar, a aula experimental é roteirizada. Esta escolha demonstra nosso interesse em fazer com que o aluno se familiarize, neste primeiro momento, com os nomes dos conceitos físicos e dos instrumentos utilizados.

Em etapa posterior, os grupos serão convidados a realizar uma prática bastante semelhante, com poucas mudanças em relação ao que está sendo executado na Parte 03. Contudo, nesta nova oportunidade, o roteiro será pouco detalhado e exigirá com que os estudantes relembrem aquilo que foi visto aqui.

Como pode ser visto no fascículo, os materiais utilizados nesta etapa também estão listados abaixo:

- Folhas de papel sulfite tamanho A4;
- Estilete;
- Tesoura;
- Régua de 30 cm de comprimento;
- EVA “tatame” de dimensões 50x50x1 cm;
- Copo de vidro cilíndrico de diâmetro igual a 5,3 cm;
- Caneta *laser pointer* preferencialmente verde;
- Alfinetes de cabeça;
- Água;
- Fita adesiva “Durex”;
- Canetas e lápis.

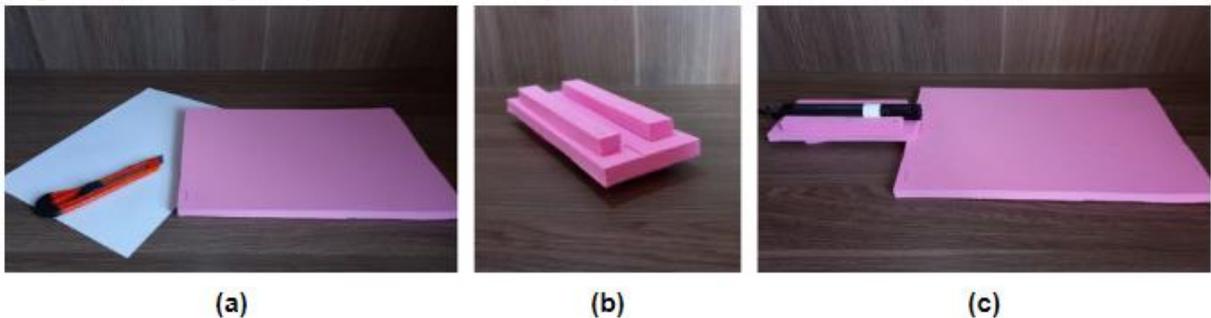
Uma vez que os materiais para a atividade estão separados, os alunos podem proceder a leitura do fascículo e a realização do experimento.

Tudo tem início com a construção de um suporte para uma folha de papel sulfite e uma base para a caneta *laser pointer*. Estes componentes serão confeccionados com papel EVA cujas dimensões são 50x50x1 cm. Em papelarias este material pode ser encontrado com o nome de “tatame”.

Para construir o suporte, basta usar as medidas das bases de uma folha sulfite e recortar o tatame com um estilete (ou tesoura).

Já a base deve permitir que a caneta *laser* fique parada acima do plano do suporte fabricado anteriormente. As imagens a seguir demonstram: (a) o suporte para a folha, (b) a base para a caneta *laser* e (c) a forma como ambos serão utilizados durante a experimentação.

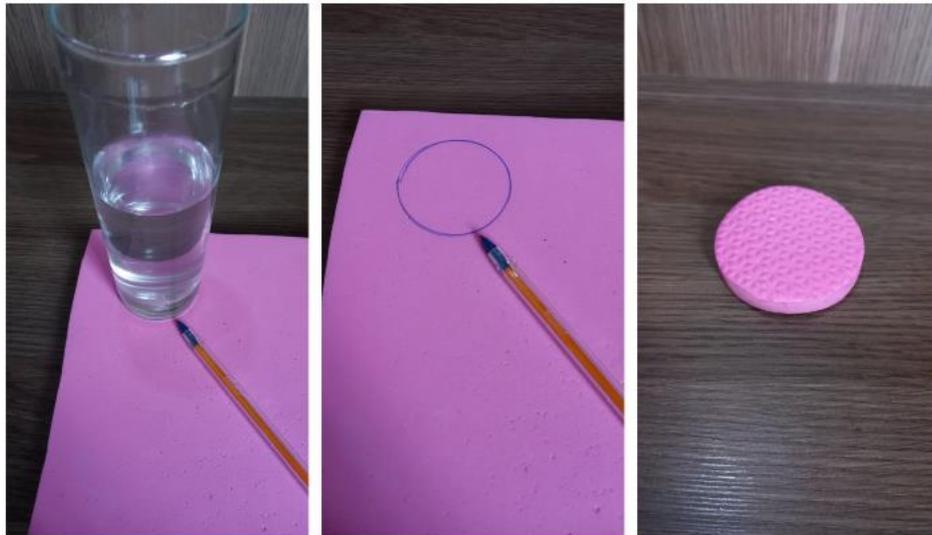
Figura 20: Confeção, a partir do EVA, do suporte para a folha sulfite e da base para a caneta *laser*.



Fonte: o autor.

Este EVA mais grosso também servirá para a confeccionar uma vedação para um copo de vidro. Especificamos no material que este copo deverá necessariamente ser cilíndrico e seu diâmetro recomendado é de 5,3 cm. Posicionando o recipiente sobre o tatame, marcamos com uma caneta o comprimento de sua circunferência e usamos o estilete para recortar o círculo.

*Figura 21: Fabricação da vedação para o copo cilíndrico.*



Fonte: o autor.

Enchemos o copo com  $2/3$  de seu volume e o tampamos com o círculo fabricado. É prudente testar a preparação e virar o conteúdo do copo sobre uma pia. Caso haja vazamentos, recomendamos a utilização de uma fita veda-rosca.

As imagens desta seção, que se repetem no produto educacional e estarão disponíveis para os estudantes, permitem com que o leitor se situe na preparação do experimento.

É prudente lembrar, inclusive, que estas ilustrações podem ser projetadas em uma tela para os estudantes. Elas podem ser acessadas na seção “Slides”, disponível no apêndice IV do produto educacional.

O copo com água deverá ser colocado sobre uma folha de papel. Esta, por sua vez, estará disposta acima do suporte de EVA fabricado. Esta situação está ilustrada na imagem a seguir.

*Figura 22: Disposição do aparato experimental.*



Fonte: o autor.

Logo de início, os estudantes deverão contornar, com caneta, a circunferência do copo sobre o papel. A partir deste momento, o copo não poderá mais ser transladado. É importante tomar o cuidado de realizar esta marcação no começo, tendo em vista que esquecer este procedimento pode resultar na inviabilização da continuidade do experimento.

O suporte com o *laser* deverá ser colocado de maneira com que o feixe passe pelo centro do copo. Em seguida, o mesmo suporte deverá ser movimentado para o lado até que os feixes de luz que saem do recipiente estejam na configuração indicada na figura 23.

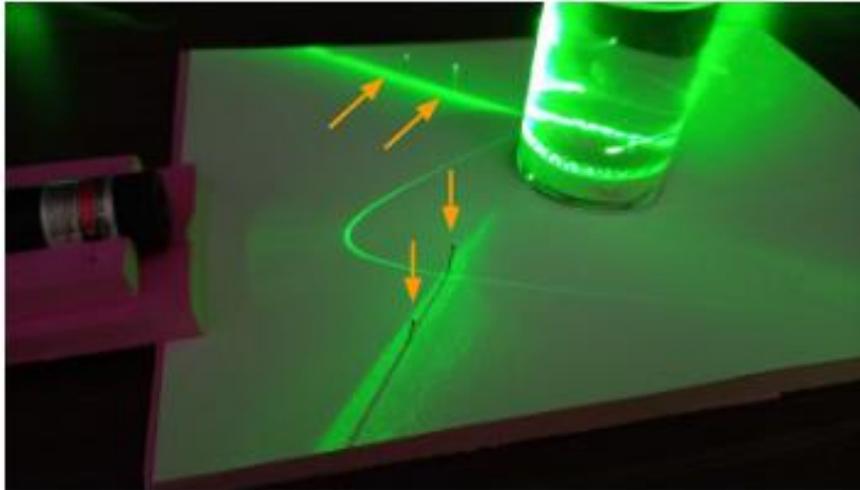
*Figura 23: Feixes de luz saindo do corpo com água durante a realização do experimento.*



Fonte: o autor.

Com o uso de alfinetes, os alunos devem marcar alguns pontos específicos, fixando-os sobre a folha acima do suporte de EVA. Dois alfinetes deverão ser colocados sobre um dos feixes que saem do recipiente, tal como mostrado abaixo.

Figura 24: Disposição de alfinetes para a marcação dos raios de luz que saem do copo.



Fonte: o autor.

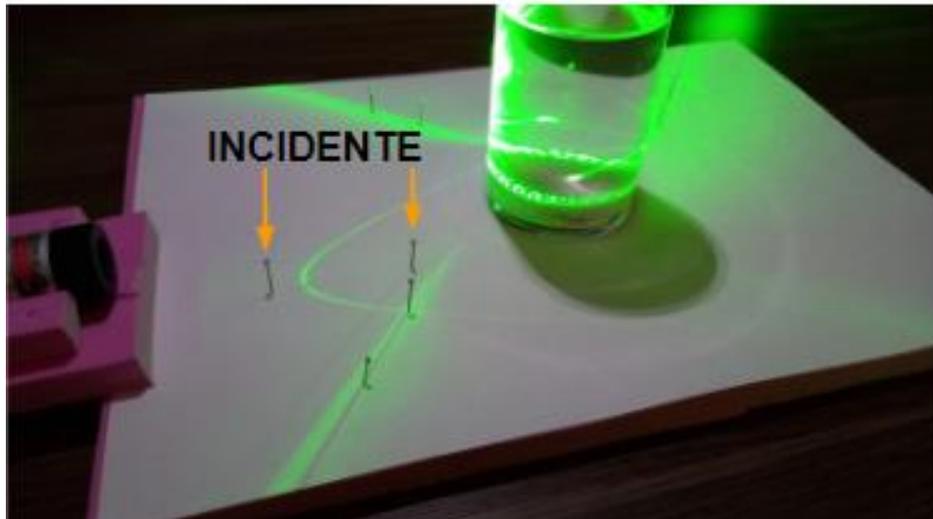
Outros dois alfinetes devem ser fixados sobre o segundo feixe. Este processo é semelhante ao anterior, de modo que seja dispensável ilustrar a referida situação neste momento. A mesma atitude deve ser repetida para o outro lado da folha de papel, de modo que, ao final deste momento, existam seis alfinetes dispostos sobre os três raios que emergem da gota.

Enquanto estas marcações são realizadas, é conveniente o professor ressaltar uma informação básica da geometria plana euclidiana: dois pontos definem uma reta. E estas retas irão representar os raios emergentes do copo.

O próximo processo é um dos mais complicados: trata-se da marcação do raio que incide sobre o copo.

Um alfinete deve ser posicionado exatamente sobre o feixe incidente, antes de a luz chegar ao copo. Caso estes alfinetes sejam de “cabeça”, o posicionamento dele pode causar a interrupção do raio de luz e o “sumiço” dos feixes que saem do copo. Quando esta referência for marcada, outro pode ser colocado em sua sombra, de modo que estará definido o raio incidente.

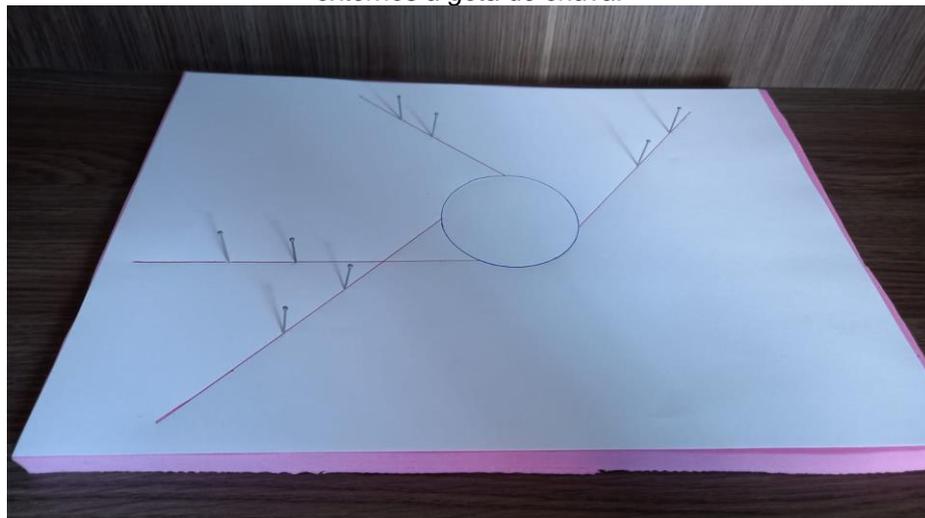
Figura 25: Marcação do raio incidente.



Fonte: o autor.

Com uma régua, os grupos podem traçar as retas que saem do copo e aquela que chega até o recipiente. Basta posicioná-la sobre alfinetes e utilizar uma caneta para realizar as ligações. Setas devem ser feitas para mostrar o sentido de propagação da luz.

Figura 26: Segmentos de retas que passam pelos alfinetes e que representam os raios de luz externos à gota de chuva.



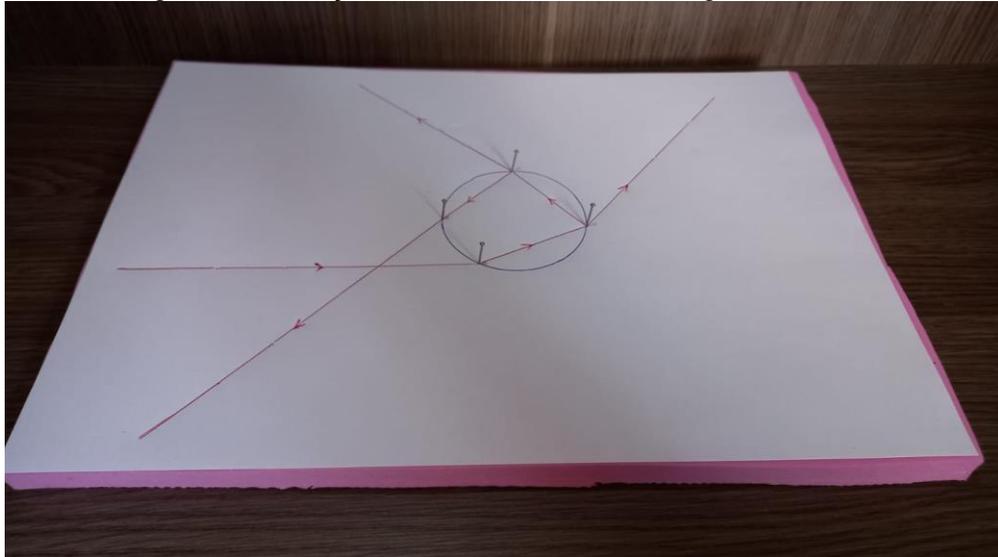
Fonte: o autor.

Para finalizar, os estudantes são instruídos através do fascículo a traçar os raios que se propagam dentro da água. Esta atividade é semelhante àquela que já fizeram no passado, na atividade III, tendo por base apenas as suas suposições.

Munidos de alfinetes, os alunos devem inseri-los nos pontos em que os raios de luz interceptam a circunferência do copo. Após isso, utilizam a régua para conectar

estes pontos através de retas. O resultado deve ficar parecido com o que se observa na figura 27.

*Figura 27: Ilustração dos raios de luz internos à gota de chuva.*



Fonte: o autor.

É interessante notar que o capítulo Parte 03 não traz nenhuma imagem a respeito desta etapa da experimentação, o que a diferencia das anteriores. O professor deve deixar que os próprios alunos interpretem o comando e o executem, fazendo correções caso o entendimento não tenha sido o adequado.

O poder deste experimento é bastante grande quando analisamos sua relação com os referenciais teóricos escolhidos. Ao completar o desenho, o estudante está passando de um modo de representação cuja manipulação do fenômeno é o fator mais importante, para outro, em que a imagem formada a partir do domínio do primeiro modo já permite realizar operações mentais.

Ademais, produzir algo a partir da ilustração ou da escrita são algumas das maneiras de se criar o Conhecimento Real Exterior e, a partir desse ato motor, realizar procedimentos de busca mais eficientes em nosso inconsciente sobre dado assunto.

Por conta disso, esta terceira etapa tem fim quando os estudantes, de maneira individual, descrevem na seção “Refleta & Responda” o que acontece quando um raio de luz intercepta uma gota de chuva.

#### 4.1.4 Quarta etapa

Esta etapa é muito importante, pois ela não somente aproveita o que foi visto anteriormente, como também prepara o caminho para o prosseguimento dos estudos a respeito dos fenômenos ópticos da reflexão e da refração da luz.

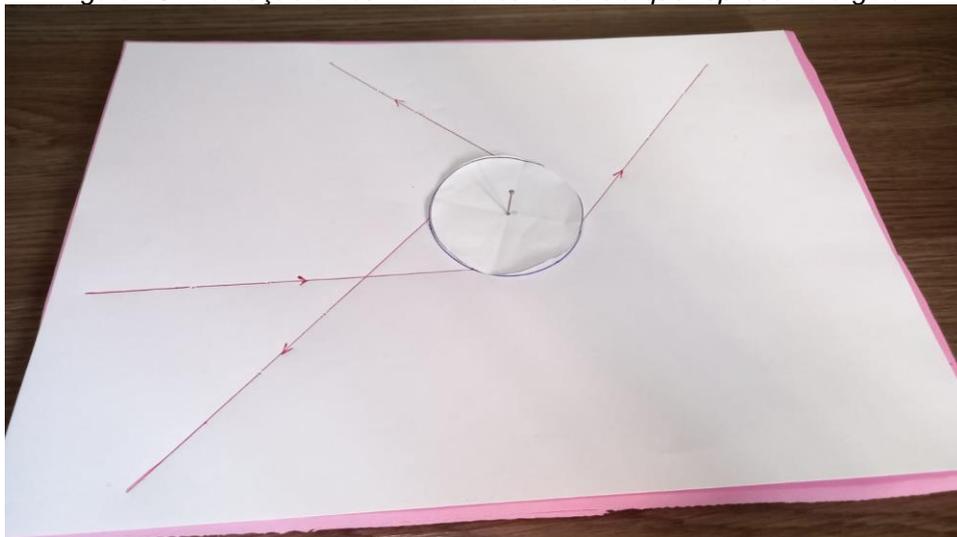
O ambiente de aprendizagem deve ser novamente montado, com grupos que tenham os mesmos integrantes da Parte 03. Com alguns materiais - que estão listados abaixo -, o objetivo destes estudantes será marcar ângulos que são muito relevantes para a óptica geométrica.

Inicialmente, o comprimento do mesmo copo utilizado na etapa anterior servirá de parâmetro para recortar mais um círculo, desta vez de papel sulfite. Este recorte deverá ser dobrado duas vezes, de modo que o centro do círculo esteja na intersecção das dobras.

Os estudantes devem marcar este centro com uma caneta.

Em seguida, o professor entregará as folhas de papel produzidas na Parte 03, em que foram marcados os raios de luz que chegam e saem do copo e também aqueles que se propagam dentro da água. Sobre a circunferência que representa o recipiente, o recorte circular será inserido e, em seu centro, fixado um alfinete.

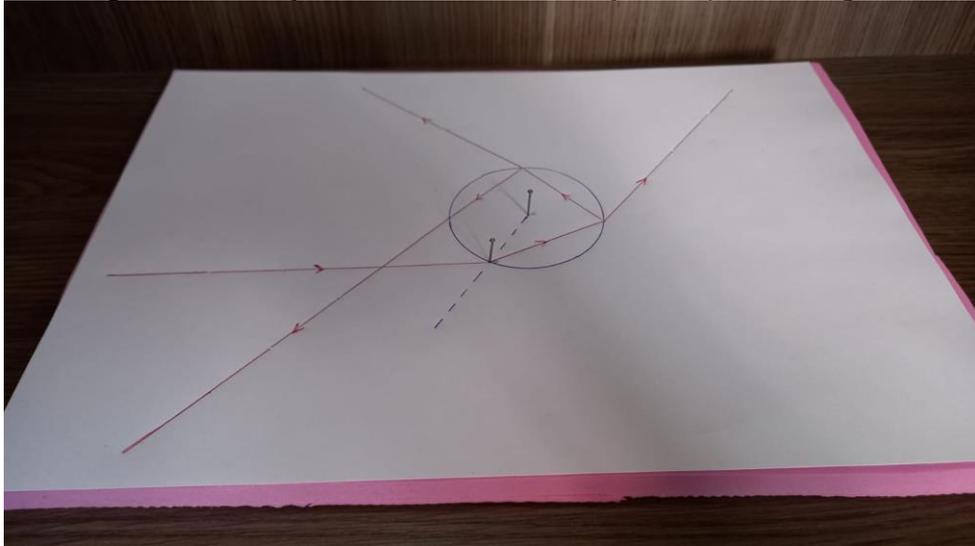
*Figura 28: Marcação do centro da circunferência que representa a gota.*



Fonte: o autor.

No primeiro ponto de incidência da luz do *laser* no copo, um outro alfinete deve ser fixado. A reta que liga o centro até este ponto deverá ser traçada com o uso de uma régua e, de preferência, pontilhada. Esta é a reta normal à incidência da luz na superfície em que a refração vai ocorrer e é uma referência muito importante para a medição de ângulos.

Figura 29: Marcação da reta normal em relação à superfície da gota.

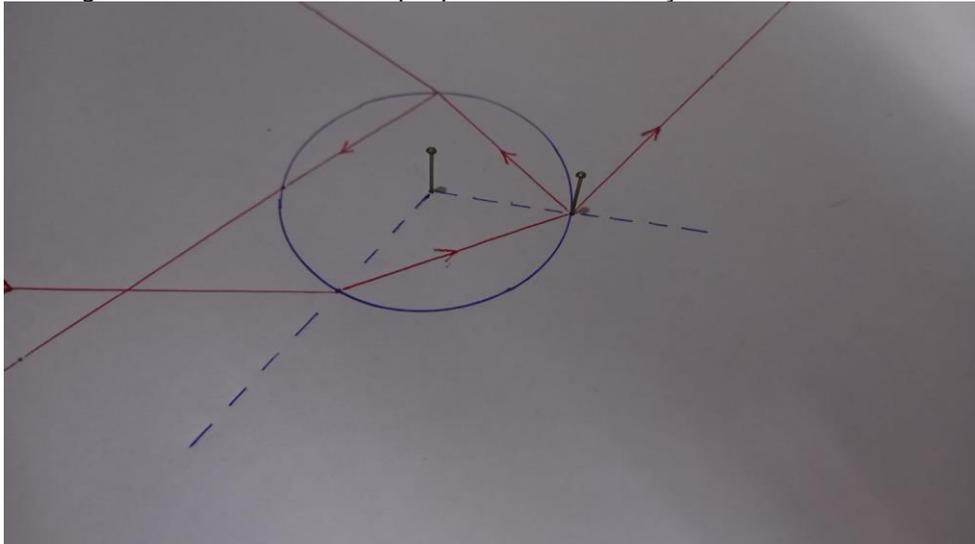


Fonte: o autor.

Um transferidor será utilizado para medir os ângulos de incidência e refração. Estes dados, uma vez anotados, serão úteis para a determinação do índice de refração da água através da lei de Snell-Descartes. A turma efetuará este cálculo em encontros próximos.

Usando uma sistemática parecida, a lei da reflexão que diz que o ângulo de reflexão é igual ao de incidência pode ser verificada com este experimento. Para tanto, os alunos devem marcar com outro alfinete o ponto da primeira reflexão interna da luz no recipiente circular. Uma nova reta pontilhada que ligue o centro do círculo até este ponto é a normal que será referência para a medição destes ângulos. A utilização adequada do transferidor dará estes dados aos grupos.

Figura 30: Reflexão interna que permite a confirmação da lei da reflexão.



Fonte: o autor.

Outros princípios da óptica geométrica podem ser discutidos durante a marcação dos ângulos e das retas: irreversibilidade, independência e propagação retilínea devem receber comentários com o decorrer da prática.

Com estes ângulos marcados, o professor deve proceder uma discussão sobre os tópicos estudados e sobre as leis físicas confirmadas com o experimento. É imperativo que a ampla participação dos alunos seja incentivada neste momento. A marcação de números (ângulos) que fazem alusão às leis da óptica é um passo importante no sentido de superar um modo de representação menos abstrato para outro que contemple a utilização de símbolos e códigos.

#### 4.1.5 Quinta etapa

Esta Parte 05 tem uma função relevante em nossa empreitada de conhecer o arco-íris: é o momento no qual focaremos esforços em aprender, com o uso do vocabulário científico adequado, as leis da reflexão e da refração da luz. As quatro aulas destinadas para esta etapa são necessárias não somente para discussões sobre a teoria de nosso estudo, mas também para a familiarização dos alunos com o sistema de símbolos e códigos utilizado.

A primeira aula tem início com um diálogo a respeito do que foi visto até aqui, contemplando os processos realizados desde a Parte 01 até as conclusões obtidas com a realização do experimento e medição dos ângulos nas etapas 03 e 04. Os

estudantes devem participar deste momento, mostrando que já dominam alguns conceitos e sabem expressar com objetividade estes conhecimentos.

O professor pode, inclusive, pedir aos aprendizes que escrevam na lousa o nome de alguns fenômenos e façam relações entre eles.

Passada essa discussão inicial, os alunos receberão o fascículo Parte 05 e serão orientados a realizar a leitura do tópico “Reflexão da luz”. O docente deve prezar pelo silêncio da turma durante a análise do texto e pedir aos estudantes que grifem as ideias mais relevantes, que destaquem aquilo que tem relação com o que está sendo estudado.

Com a leitura finalizada, o professor conduzirá uma aula expositiva dialogada sobre o fenômeno da reflexão da luz. Os *slides* presentes no apêndice IV do produto educacional trazem ilustrações e esquemas que podem auxiliar o professor nesta tarefa.

É prudente destacar que toda a conversa desenvolvida aqui faça referências ao experimento realizado na Parte 03. As contribuições dos estudantes nessa discussão devem ser comemoradas, pois são indicativos de que eles estão conseguindo realizar a conexão entre a prática e a teoria.

Recomenda-se que na terceira aula desta sequência, o mesmo procedimento seja realizado para a refração da luz. Os estudantes serão convidados a fazer a leitura do tópico presente no fascículo e, em seguida, o professor complementar o estudo falando sobre o referido fenômeno.

Esta exposição, contudo, terá um componente especial: a aplicação da lei de Snell-Descartes a partir dos dados coletados por cada grupo da etapa anterior. Após devolver as folhas com a marcação dos ângulos, o professor deve construir na lousa uma tabela que contemple, para cada grupo, informações sobre o ângulo de incidência, de refração, o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração, o índice de refração do ar e o índice de refração da água.

As equipes devem ser auxiliadas no cálculo do índice de refração da água. Este momento é crucial na passagem do modo de representação ativo e icônico para o simbólico.

Isto pode ser verificado com o que ocorreu com o raio de luz ao passar do ar para a água. Ao trocar de meio, o feixe perde velocidade (o índice de refração aumenta) e, por este motivo, se aproxima da reta normal: isto pode ser verificado não somente pelo desenho, como também pelos ângulos medidos. Conclusão semelhante

pode ser percebida quando avaliamos o raio que sai da água e vai para o ar: a velocidade do feixe aumenta e ele se afasta da normal. No diálogo a respeito dos dados da tabela é possível provocar este tipo de dedução dos estudantes.

Caso ainda haja tempo após a exposição, os alunos serão chamados a fazer uma bateria de exercícios sobre os fenômenos ópticos estudados. É importante salientar que a presença destes testes aqui tem dois objetivos: fazer com que se familiarizem com os nomes dos conceitos e exercitem a aplicação das leis. Reconhecemos que este tipo de atividade tem menos “peso” na aprendizagem em comparação com as executadas em situações-problema de enunciados abertos.

#### 4.1.6 Sexta etapa

“Explorando (novas) alternativas” é o nome desta sexta etapa em virtude de que o experimento a ser realizado aqui não é uma novidade para os alunos. Aqueles que participaram da etapa 03 já conhecem alguns dos procedimentos que serão repetidos aqui. Há apenas alguns momentos distintos, mas nada que complique demais a execução da prática.

Ao receber o fascículo Parte 06 o aluno pode estranhar que o roteiro para a experimentação é bastante diferente daquele utilizado no passado. Há menos imagens e as descrições são mais simplificadas, geralmente fazendo uso dos nomes dos fenômenos, raios e retas supondo que os estudantes já dominam este vocabulário.

Com o ambiente de aprendizagem formado, os grupos seguirão os passos com o auxílio do texto. É prudente que algumas preparações feitas na Parte 03 sejam reaproveitadas aqui, por economia de tempo e material. O copo com água vedado e o suporte de EVA para a folha de papel sulfite são alguns exemplos de materiais que serão reutilizados nesta etapa.

A lista dos referidos materiais pode ser obtida na Parte 06 do produto educacional e está reproduzida abaixo:

- Folhas de papel sulfite tamanho A4;
- Estilete;
- Tesoura;
- Régua de 30 cm de comprimento;
- EVA “tatame” de dimensões 50x50x1 cm;

- Copo de vidro cilíndrico de diâmetro igual a 5,3 cm;
- Lanterna de luz branca;
- Alfinetes de cabeça;
- Água;
- Fita adesiva “Durex”;
- Canetas e lápis.

O início do experimento é conhecido: O copo com água deverá ser colocado sobre uma folha de papel que está disposta acima da base retangular de EVA. Com uma caneta, os estudantes marcam a circunferência do recipiente. Neste momento, todos já sabem que o copo representa uma gota de chuva; desta forma, utilizaremos a denominação “gota” como sinônimo de “copo”.

Em vez de dispor a caneta *laser* na extremidade do papel, desta vez utilizaremos uma lanterna de cor branca. Para limitar a quantidade de luz que chega até a gota, é recomendável prender uma tira de papel preto em torno do copo como ilustrado abaixo.

*Figura 31: Utilização de tira de papel preto para limitar a quantidade de luz que chega até o copo.*

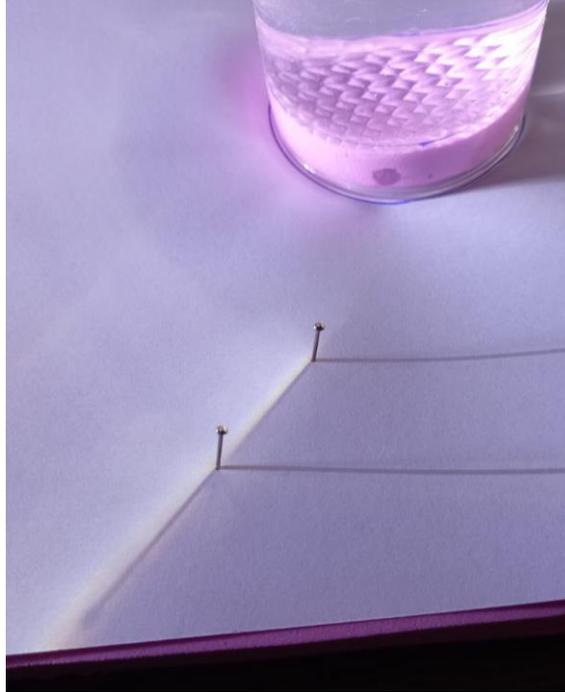


Fonte: o autor.

Com a lanterna ligada, os estudantes poderão verificar que os raios refratados para fora da gota são coloridos, tal como o arco-íris. Poderão ser observados, inclusive, os feixes que representam o arco-íris secundário, menos intenso e com as cores invertidas. Caso haja dificuldade na verificação destes raios, o copo pode ser

levemente movimentado, fazendo com que os feixes se aproximem da circunferência do recipiente.

*Figura 32: Feixe de luz colorida refratando para fora do copo.*

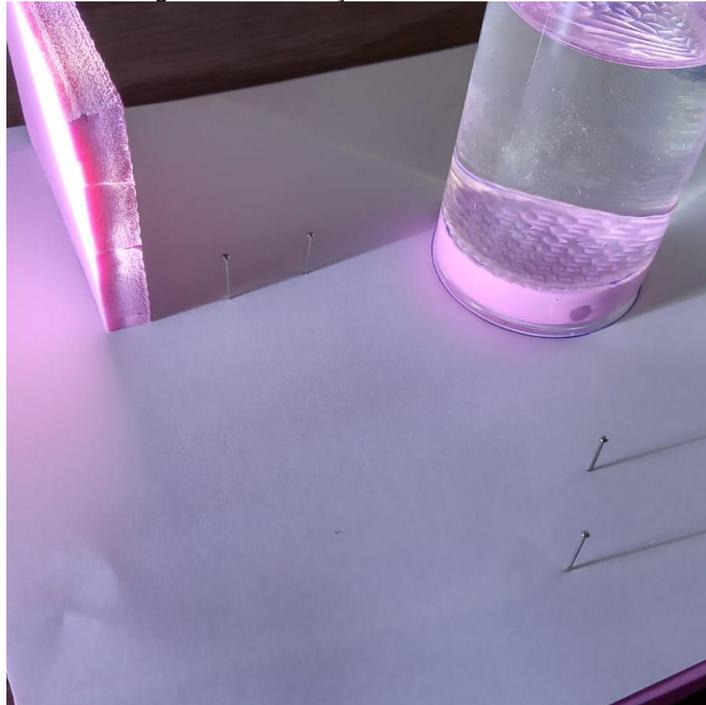


Fonte: o autor.

Alfinetes devem ser inseridos nos raios de luz coloridos (os mais intensos). Tal como da outra vez, dois alfinetes são suficientes para marcar a reta que representa os feixes refratados.

Um obstáculo pode ser colocado a frente do copo, entre a luz e ele, para obter o raio de luz que incide sobre a gota de chuva. Um retângulo de EVA pode ser esse instrumento. Os alunos devem movimentá-lo até que os feixes coloridos desapareçam. Se tais raios desapareceram, é porque deixou de chegar ao copo o feixe que lhes dava origem: este pode ser marcado com alfinetes através da sombra deste obstáculo retangular na folha de papel.

*Figura 33: Marcação do raio incidente.*



Fonte: o autor.

Neste experimento, é natural que exista certa dificuldade em se marcar o ponto em que há a primeira reflexão da luz no interior da gota.

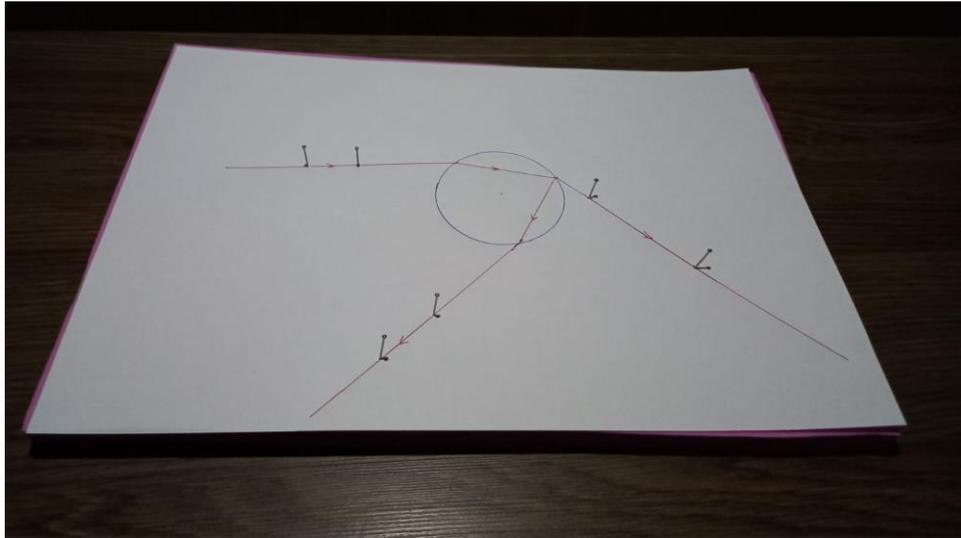
Para tanto, os grupos devem ser orientados a observar que na outra extremidade da folha há uma sombra relativa aos alfinetes que representam o raio incidente. Nesta sombra, outros dois alfinetes alinhados devem ser fixados.

Com tudo isto feito, passamos para a descrição do próximo procedimento.

Retira-se o copo de cima da folha de papel. Com uma régua, os estudantes deverão traçar as retas que representam o raio incidente, o primeiro e o segundo raios refratados para fora da gota de chuva. Setas serão colocadas sobre estas retas para representar o sentido de propagação da luz.

Nos pontos em que estas retas interceptam a circunferência do copo, novos alfinetes serão fixados. Estes servirão de base para que, com a régua, os grupos desenhem as retas que representam os raios de luz que se propagam dentro da água.

Figura 34: Representação dos raios de luz internos e externos à gota marcados através do uso de alfinetes.



Fonte: o autor.

O círculo de papel sulfite produzido na etapa 04 pode ser reaproveitado aqui. Tal como foi lá, sua função é possibilitar a marcação do centro da circunferência. Basta posicioná-lo exatamente sobre o círculo que representa a gota e espetar um alfinete no ponto central.

Ligando-se este ponto até aquele em que ocorre a primeira incidência do raio de luz, é possível traçar uma reta pontilhada que representa a normal. Com o transferidor, os estudantes podem obter novamente os ângulos de incidência e refração.

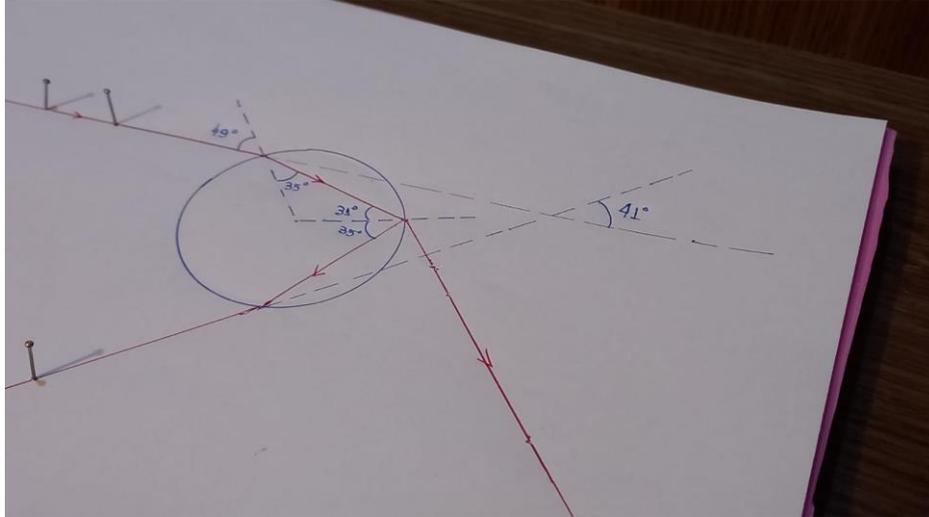
No ponto em que ocorre a primeira refração para fora da gota e também a primeira reflexão interna, uma outra reta normal pontilhada pode ser desenhada. O transferidor novamente assume a posição de destaque, permitindo com que os grupos obtenham o ângulo de incidência e de reflexão neste ponto que, como já foi visto, deverão ser iguais.

Fora os procedimentos um pouco diferentes, este experimento é muito parecido ao que foi executado anteriormente. Contudo, o fascículo pede algo a mais: obter, com o transferidor, o desvio sofrido pelo raio de luz ao passar pela gota.

É possível notar que o material não traz uma listagem de procedimentos que permitam medir tal ângulo. Neste instante, os alunos terão de chegar a um consenso sobre a forma que irão resolver este problema. Ao professor caberá apenas, em um primeiro momento, pedir para que os grupos façam esta parte da atividade a lápis. Já em um segundo momento, pode se dar ao trabalho de provocar os estudantes a respeito de suas hipóteses.

Para fazer esta medição, uma das possibilidades é que dois raios sejam prolongados: o que incide sobre a gota e aquele último que emerge dela. No ponto em que estes prolongamentos se encontrarem, o transferidor pode fornecer o desvio sofrido pela luz ao atravessar a gota.

Figura 35: Medição do desvio angular sofrido pelo raio de luz ao passar pela gota.



Fonte: o autor.

Após a realização deste experimento, os alunos poderão novamente calcular o índice de refração da água, tendo como dados os ângulos de incidência e refração medidos com o transferidor. Para tanto, recordar que o índice de refração do ar vale 1 (aproximadamente) e correta utilização da lei de Snell-Descartes serão suficientes.

Ao fim, o professor conduzirá uma discussão com os alunos a respeito do procedimento, destacando inclusive possíveis dificuldades e erros provenientes delas. Como gancho para o próximo encontro, pode lançar mão do questionamento acerca dos motivos para o qual a luz, que era branca, se decompôs nas cores do arco-íris.

#### 4.1.7 Sétima etapa

Após ter contato direto com o fenômeno da dispersão da luz branca na etapa anterior, chegou o momento de mostrar aos alunos o que ocorre para que a luz do Sol se divida em suas componentes quando ela incide sobre uma gota de chuva.

Para tanto, mais uma vez será utilizado o simulador “Desvio da Luz”, desenvolvido pelo PhET Colorado e que já usado na Etapa 01 deste produto educacional. Por mais que não haja forma de se calcular diretamente de uma vez só

o desvio sofrido por cada componente da luz branca quando ela passa do ar para a água, há como fazer essa análise em partes.

Novamente, enfatizamos que o ideal é que esta atividade seja feita em um laboratório de informática. Contudo, em virtude de o aplicativo estar no formato HTML5 e ser muito fácil rodá-lo em *smartphones*, ter internet liberada para os celulares dos estudantes já supre bem essa necessidade.

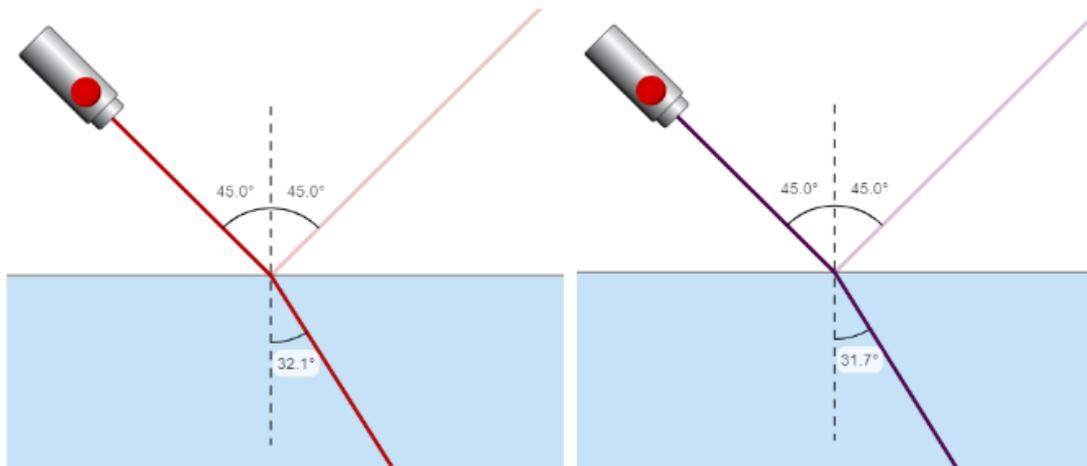
Logo ao acessar o simulador, os estudantes serão orientados a trocar a opção “Raio” por “Onda”. Esta é apenas uma referência visual que queremos dar aos nossos alunos: ao observar com atenção, eles poderão notar que a distância entre as cristas das frentes de onda que representam o raio de luz muda quando ele se propaga no ar e na água. Esta distância é conhecida como “comprimento de onda”. Por mais que aspectos mais complexos da óptica física não sejam o enfoque deste material, questionamentos com relação a isso podem surgir por parte dos estudantes e o docente deve estar preparado para respondê-los.

Depois disso, o estudante será orientado a mover o marcador até um dos extremos do espectro da luz visível, no vermelho (700 nm). Com isso feito, marcará a opção “Ângulos” e registrará os dados relativos ao ângulo de incidência e ao de refração.

Em seguida, deverá realizar o mesmo procedimento para a cor violeta, cujo comprimento de onda sugerido é o de 380 nm. No fascículo há uma tabela para que os valores desses ângulos sejam devidamente compilados.

A imagem abaixo faz a comparação entre o que o simulador mostra em cada um destes casos.

Figura 36: Uso do simulador “Desvio da luz” para observar as diferenças na refração sofrida por um raio de luz nas cores vermelho e violeta.



Fonte: o autor.

Por mais que o aplicativo traga informações a respeito do índice de refração da água para cada uma das cores do raio de luz, o material didático pede que os estudantes realizem o cálculo deste valor usando a lei de Snell-Descartes tanto para o vermelho quanto para o violeta. Se a conta for efetuada de maneira correta, os grupos poderão concluir que, a depender da cor que incide sobre o material, o índice de refração do mesmo será diferente e, por conta disso, o desvio sofrido pelo raio de luz não será igual.

Ideias como esta devem ser descritas na seção “Reflita & Responda” deste capítulo do produto educacional.

Esta sétima etapa não prevê um fechamento teórico, com o professor expondo a respeito do fenômeno da dispersão da luz branca. Ao invés disso, o tempo para esta atividade será empenhado no esforço dos alunos em descrevê-lo, usando o vocabulário científico adequado.

#### 4.1.8 Oitava etapa

Tendo em vista que a nona etapa é constituída apenas de um questionário de verificação dos conhecimentos adquiridos pelos estudantes, esta Parte 08 representa a última vez que os alunos terão contato com a teoria por trás da explicação da formação do arco-íris.

Após a entrega do fascículo Parte 08 para os educandos, o docente deve conduzir uma discussão a respeito daquilo que foi visto no encontro anterior. O último parágrafo da seção 4.1.7 já deixava claro que não havia espaço, naquela

oportunidade, para um fechamento teórico a respeito da dispersão da luz branca. Justificamos esta escolha em virtude do início desta aula. O “Reflita & Responda” deve ser utilizado como ponto inicial das discussões com os estudantes, entretanto, o professor pode ainda lançar mão de outros questionamentos, tais como “o índice de refração da água muda quando mudamos a cor incidente?” e “as cores violeta e vermelho desviam da mesma forma?”. As próprias perguntas e curiosidades dos alunos podem ser usadas para concluir este estudo.

Com a ideia concluída a respeito deste tópico, passamos à reunião dos conceitos vistos até esta Parte 08 na explicação clássica da formação do arco-íris. Os *slides* disponíveis no apêndice IV do produto educacional podem auxiliar o professor a promover uma aula expositiva dialogada.

É prudente destacar que, a esta altura da aplicação do produto educacional, os aprendizes já devem dominar os modos de representação simbólicos de todos os fenômenos abordados. Isto é, são plenamente capazes de fazer valer seu Poder Efetivo e extrapolar o conhecimento que já têm a respeito da reflexão, da refração e da dispersão luminosa.

Desta forma, espera-se grande participação dos alunos durante a exposição da teoria. Esta cooperação deve ser incentivada, com perguntas direcionadas a respeito da teoria vista e dos experimentos realizados.

Como é previsto pelo Plano de Aula - Parte 08, o professor deve iniciar sua fala mostrando que a luz branca proveniente do Sol, ao interceptar uma gota de chuva, sofre dispersão. O vermelho desvia mais que o violeta em relação à reta normal e, por isso, percebemos a decomposição do feixe.

Sempre é conveniente lembrar os estudantes de que a representação que está sendo usada contempla apenas os dois extremos do espectro eletromagnético visível. As outras cores, por sua vez, encontram-se no espaço intermediário entre estes dois limites.

Com todas as dúvidas a respeito disso sanadas, o docente passa para a explicação de que, para que o arco seja visualizado, deve haver mais do que uma gota de chuva recebendo a luz do Sol. As gotas a maior altura serão notadas na cor vermelha, enquanto que as inferiores, violeta. Ademais, comenta-se que para que o fenômeno seja percebido, um ângulo de cerca de  $42^\circ$  deve ser formado entre o feixe de luz que chega aos olhos do observador e a direção em que a luz incide sobre a gota.

Para encerrar, o arco-íris secundário voltará a ser discutido. Cabem aqui alguns comentários do professor a respeito das atividades realizadas durante a aplicação do produto educacional. Ainda na Parte 02, os estudantes tiveram acesso a um artigo de ciências publicado na internet a respeito de um dito “arco-íris duplo”. Já na Parte 06, um feixe colorido menos intenso e com as cores invertidas pode ser percebido durante a prática experimental. É interessante relembrar os aprendizes a respeito desses momentos para basear a teoria que está por vir.

Os *slides* mostram que, para a formação do arco-íris secundário, há a necessidade de mais uma reflexão interna na gota de chuva. Esta reflexão faz com que a ordem das cores se inverta. Uma vez que esta reflexão adicional também está associada a uma refração que faz com que parcela considerável da luz saia da gota, o feixe que continua na água é menos intenso.

Em virtude dos motivos explicitados no parágrafo anterior, as gotas de cima irão emanar luz que será percebida como violeta por um observador. Por sua vez, as gotas de baixo serão notadas em vermelho. Para que isto aconteça, o indivíduo deve estar posicionado de modo que o ângulo de visualização esteja em um intervalo de  $50,1^\circ$  a  $53,2^\circ$ .

A aula se encerra com o convite para que os alunos façam alguns exercícios de múltipla-escolha que contemplam os tópicos reunidos nesta etapa de aplicação do material.

#### 4.1.9 Nona etapa

Neste último momento, os estudantes deverão realizar um questionário final de verificação. Este exame apresenta cinco questões que devem ser resolvidas individualmente, sem o auxílio de mecanismos de consulta.

O professor, nesta etapa, terá a função única de controlar o silêncio em sala de aula, não permitindo que os aprendizes compartilhem informações a respeito da resolução dos testes. O docente também deve se resguardar de dar dicas, tampouco confirmar se as respostas estão boas e os resultados numéricos estão certos.

As questões presentes nesse formulário variam entre múltipla-escolha, descritivas, ilustrativas e de cálculo. A ideia é que os exercícios explorem se há domínio dos modos de representação dos alunos ao mesmo tempo que permitem a

criação do conhecimento real exterior a partir das informações que os mesmos armazenam em seus inconscientes.

Também é prudente salientar que os questionamentos não visam apenas avaliar o “nível de conhecimento” dos estudantes. Seu principal objetivo, na realidade, é subsidiar o professor de informações a respeito do estágio final dos alunos para que se possa fazer comparações com a condição apresentada por eles nas etapas iniciais.

Passado o tempo de uma aula, o questionário deve ser recolhido. Com isso, cabe ao professor encerrar oficialmente o período de aplicação do produto educacional.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O produto educacional produzido foi aplicado em duas turmas, uma de segunda série do ensino médio (no ano de 2021) e outra de primeira série (em 2022) na Escola Estadual Alvino Schelbauer, da rede pública do Estado do Paraná. Considerando a soma das duas aplicações, participaram 35 alunos.

É importante destacar que, por mais que o mesmo projeto tenha sido executado com as duas turmas, houve mudanças de uma classe para a outra. Os alunos que participaram da aplicação do produto no ano de 2021 foram de certa forma prejudicados pelos protocolos de segurança contra a Covid-19. Na época, os trabalhos em grupos e o compartilhamento de materiais na instituição de ensino eram restritos e isso obrigou uma adaptação de nossa proposta. Já em 2022, com os protocolos mais brandos, foi possível executar a prática conforme havíamos planejado inicialmente.

Uma diferença marcante entre uma aplicação e outra reside no fato de que os estudantes de 2021 não receberam os fascículos, tampouco as pastas para compilá-los. Em vez disso, as mesmas propostas, teorias e instruções foram projetadas pelo *datashow* em uma tela e seus registros foram feitos em folhas de papel sulfite que eram recolhidas pelo professor ao final da aula.

Entretanto, do ponto de vista da coleta de dados e da qualidade das respostas recebidas por estes diferentes grupos de alunos, temos a segurança em afirmar que o resultado foi bastante parecido. Por conta disso, efetuamos a análise qualitativa e quantitativa das informações apreendidas de forma homogênea tanto para a turma de 2021 quanto para a de 2022. Para os casos em que houve alguma divergência muito significativa, faremos uma análise diferenciada.

Fizemos a ressalva apenas no sentido de que, em virtude dos protocolos de segurança anteriormente citados, o tempo de aplicação para o primeiro grupo foi consideravelmente maior do que para o segundo.

De maneira geral, os estudantes corresponderam bem ao produto educacional oferecido a eles, participando ativamente das atividades e dialogando com o professor durante as aulas reservadas para a exposição do conteúdo. Como será possível observar neste capítulo, os educandos evoluíram bastante entre as formas de representação do conhecimento e, à medida que as etapas eram concluídas, seus

vocabulários científicos aumentavam. Mas mais que isso, percebeu-se que a conexão entre estas verbetes se aproximava bastante do que consideramos ideal.

Com este contexto devidamente estabelecido, passamos agora para a descrição dos resultados coletados nas partes que compõe este produto educacional.

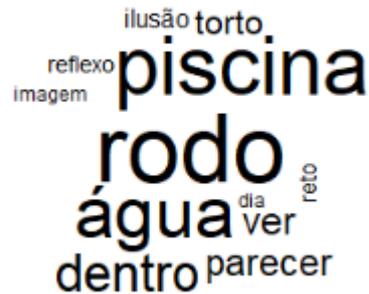
O primeiro encontro, como já havia sido programado, foi dedicado para a apresentação do método de trabalho que seria empregado e também do escopo do material didático que os estudantes receberiam a cada nova etapa. Depois do discurso inicial, os estudantes alegaram ter entendido bem o que estava sendo proposto e iniciamos a aplicação efetiva do produto educacional.

A “Parte 01” se inicia com a análise de três imagens e a descrição individual por parte dos estudantes daquilo que eles estão observando nelas. É prudente lembrar e enfatizar que neste momento os alunos não conhecem nada a respeito do vocabulário científico que está por trás dos fenômenos ópticos estudados. Desta forma, os resultados coletados aqui servem de parâmetro para analisarmos a efetividade de nosso material. Esperamos que ao compararmos as descrições escritas feitas na “Parte 09” com estas produzidas na “Parte 01”, encontremos uma significativa melhoria.

Nesta Atividade I, a primeira imagem mostra um rodo de piscina aparentemente quebrado. Os educandos foram questionados a respeito do que observavam naquela figura. Seus registros foram devidamente transcritos e importados para o *software* de análise de dados Iramuteq. Com ele, iniciamos nossa análise com a produção de uma nuvem de palavras que contempla os principais termos utilizados por eles nesta primeira descrição.

Como já era de se esperar, esta nuvem envolve poucas palavras e, por isso, reflete um vocabulário científico “pobre” dos estudantes.

Figura 37: Nuvem de palavras para a primeira imagem da Atividade I da Parte 01.

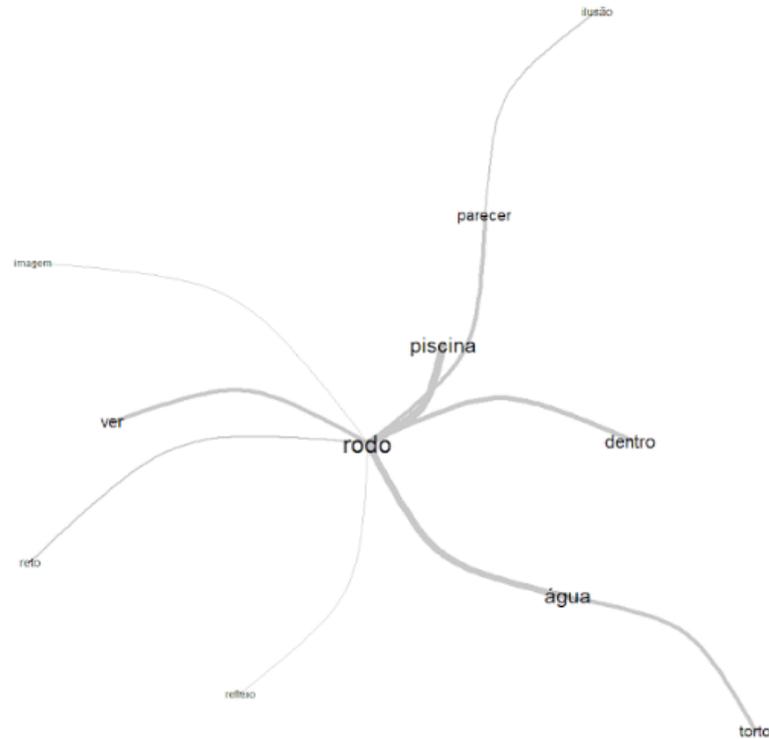


Fonte: o autor.

O fenômeno óptico, que é o da refração da luz, tampouco foi citado pelos alunos em seus escritos, o que denota o completo desconhecimento de sua existência. Contudo, notamos que eles compreendem que o rodo não está realmente quebrado e que uma distorção é observada quando este instrumento está imerso na água. Destacamos também a ausência da palavra “Luz”, tão importante para o estudo da óptica geométrica.

Para confirmar nossas suposições, também utilizamos o Iramuteq para gerar uma rede de similitude a partir dos mesmos registros. Esta análise é capaz de revelar as conexões entre as palavras, segundo metodologia que vem sendo aplicada em análises qualitativas descritas em Klamt e Santos (2021) e Sousa (2021).

Figura 38: Rede de similitude para a primeira imagem da Atividade I da Parte 01.



Fonte: o autor.

Pelo eixo central desta rede de similitude, depreendemos que os alunos percebem que o rodo que está imerso na água da piscina parece estar quebrado, contudo, isso é apenas uma ilusão. Na concepção dos alunos, é uma imagem que o observador que está fora da piscina percebe quando olha o instrumento.

Já a atividade seguinte pede que os estudantes descrevam a imagem de um prisma que decompõe um feixe de luz branca nas cores do arco-íris. A nuvem de palavras construída a partir das respostas dos estudantes está representada na figura 39.

Figura 39: Nuvem de palavras para a segunda imagem da Atividade I da Parte 01.

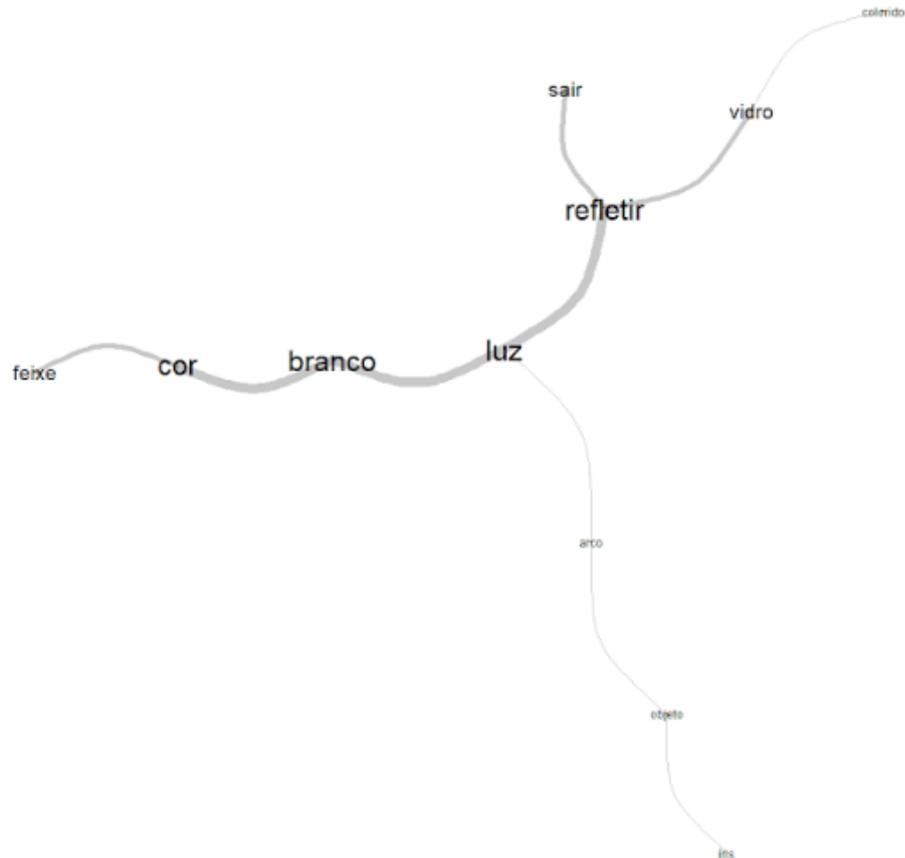


Fonte: o autor.

Com base nesta nuvem, notamos que os alunos cometeram um erro conceitual ao descrever a referida imagem. Para eles, em vez de decomposição, o feixe de luz branca que incidiu sobre o prisma de vidro sofreu uma “reflexão” que resultou nas cores do arco-íris. Convém destacar novamente que esse tipo de equívoco é esperado nesta etapa da aplicação do produto e é a partir da observação deles que o projeto se justifica.

A rede de similitude que revela a conexão entre estas palavras está apresentada na figura 40.

Figura 40: Rede de similitude que representa as respostas para a segunda imagem da Atividade I da Parte 01.



Fonte: o autor.

Tal como supomos, os educandos entendem que a luz branca é refletida pelo vidro e o resultado desse fenômeno é a existência do feixe colorido. É importante destacar que alguns alunos registraram que este feixe tem as mesmas cores do arco-íris.

Arco-íris este que é objeto de análise da Imagem 03 desta primeira etapa. Os estudantes não só teriam de descrever o que observam, como também fazer uma hipótese a respeito da explicação por trás do fenômeno retratado.

Temos abaixo a transcrição da resposta de um dos alunos que compreendeu bem o que havia sido requisitado. Mesmo usando poucas linhas, o estudante não só escreveu o que estava vendo como também registrou uma possível explicação acerca do fenômeno:

*“Vejo dois arco-íris um mais forte e outro mais fraco com as cores invertidas e o mais fraco está em cima do mais forte e o arco-íris aparece devido a luz solar nas gotículas de água.”*

A nuvem de palavras relativa a essa atividade dos estudantes está representada na imagem 41. Ela revela que os alunos sabem identificar um arco-íris e, mais do que isso, notam a existência de um segundo arco-íris na imagem, desta vez invertido com relação ao mais interno. Os educandos também percebem a diferença de luminosidade nas regiões encerradas pelo arco e, com frequência, citam a palavra “reflexão” como o motivo para o aparecimento deste fenômeno. Outras verbetes que não têm relação direta com o aparecimento do arco-íris - tais como “prédio” e “cidade” - também mereceram a atenção dos alunos.

Figura 41: Nuvem de palavras relativa à imagem 03 da Atividade I da Parte 01.



Fonte: o autor.

A rede de similitude abaixo foi construída a partir das mesmas palavras utilizadas na nuvem anterior. Ela confirma o insistente equívoco dos alunos em associar o fenômeno da reflexão da luz como o único por trás da formação do arco-íris. Também destacamos que vários alunos acreditam que o arco-íris secundário é, na realidade, um reflexo do arco-íris primário.



escritos dos alunos, entretanto, encontramos uma insistente associação entre o fenômeno da reflexão da luz e aquilo que pode ser observado nas imagens.

A nuvem de palavras deste “Refleta & Responda” é, mais uma vez, bastante econômica.

*Figura 43: Nuvem de palavras para o primeiro “Refleta & Responda” da Parte 01.*

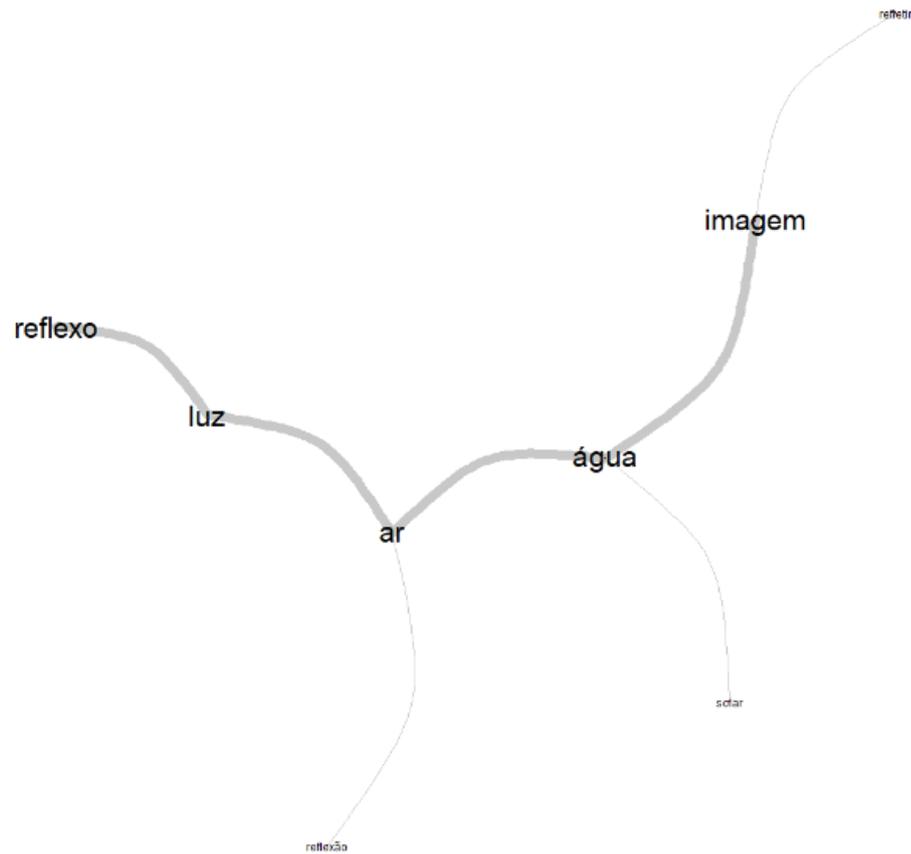


Fonte: o autor.

Podemos notar que os educandos realmente notaram que a luz se propaga em meios diferentes - o que se revela pelo uso frequente das verbetes “ar” e “água” - e, conforme já havíamos pontuado, o fenômeno da reflexão é o único conhecido por eles.

A rede de similitude explicita a conexão entre as palavras mais utilizadas pelos alunos. Neste nível incipiente da aplicação de nosso produto, os estudantes parecem crer que tanto a “ilusão de óptica” da primeira imagem, quanto a dispersão da luz no prisma e a formação do arco-íris devem-se exclusivamente à reflexão do feixe luminoso na água ou no vidro.

Figura 44: Rede de similitude para o primeiro “Refleta & Responda” da Parte 01.



Fonte: o autor.

Já o segundo “Refleta & Responda” desta Parte 01 teve um resultado bastante interessante. Após usar o simulador “Desvio da Luz” do Phet Colorado e responder alguns questionamentos que tinham como objetivo único direcionar a análise neste *software*, os alunos demonstraram já ter adquirido um pequeno vocabulário sobre um fenômeno até então desconhecido: a refração da luz.

Figura 45: Alunos manipulam o simulador “Desvio da Luz” do PhET Colorado.



Fonte: o autor.

Em um dos registros, um estudante busca diferenciar a reflexão da refração atentando ao fato de que em “*uma delas a velocidade diminui e outro continua a mesma velocidade*”. Já outro pontuou que “*A reflexão e a refração acontecem ao mesmo tempo sendo que a reflexão tem a intensidade diminuída a refração tem a velocidade da luz diminuindo*”.

Quando produzimos a nuvem de palavras relativa a este registro, encontramos a palavra “*velocidade*” em um nível de importância muito grande, assim como “*luz*” e “*refração*”. Isso nos leva a crer que os alunos que participaram desta etapa efetivamente relacionaram o fenômeno em questão com a mudança da velocidade do raio.

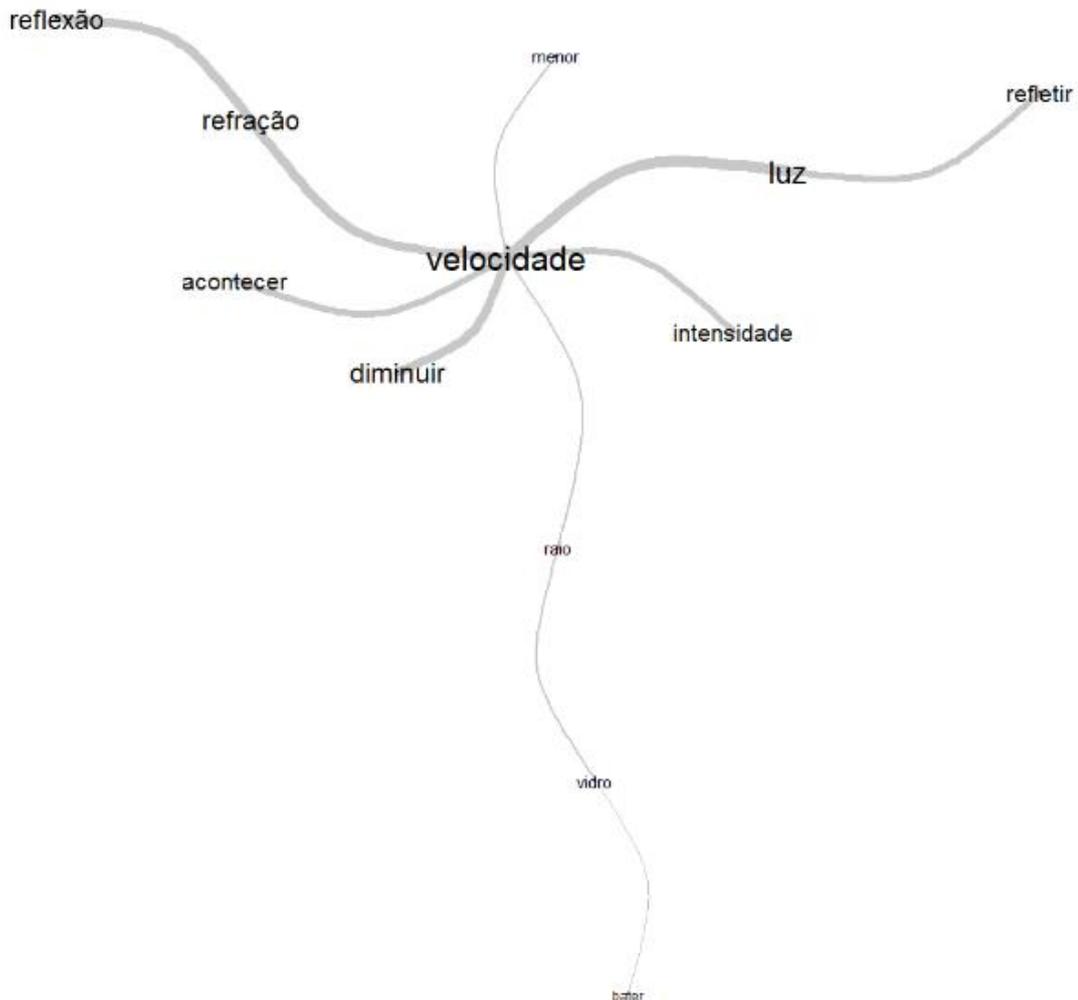
Figura 46: Nuvem de palavras para o segundo “*Refleta & Responda*” da Parte 01.



Fonte: o autor.

Além disso, percebemos a grande relevância das palavras “reflexão” e “intensidade”. Com o direcionamento dado pelo produto educacional, os alunos notaram que o feixe de luz que era refletido na interface ar-água perdia intensidade justamente porque uma parcela considerável da luz incidente atravessava a fronteira entre os dois meios materiais.

Figura 47: Rede de similitude relativa ao segundo “Refleta & Responda” da Parte 01.



Fonte: o autor.

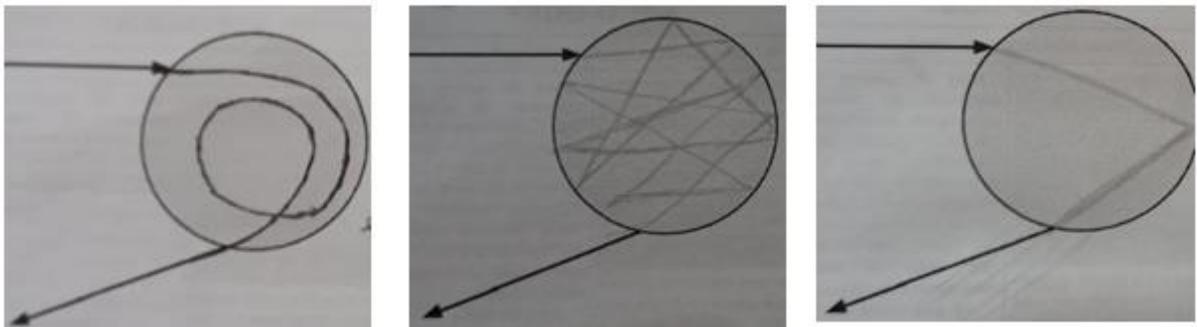
Analisando a rede de similitude, observamos a palavra “velocidade” centralizada. Encaramos isso como um imenso sucesso desta primeira etapa de aplicação do produto, uma vez que é frequente encontrarmos alunos que associam à refração apenas o desvio angular sofrido pela luz. Nossos estudantes, por sua vez, relacionaram com a mudança (neste caso, diminuição) da velocidade de propagação do raio luminoso.

A “Parte 02” teve início com a leitura de um texto de ciências extraído da internet que traz informações a respeito da formação do arco-íris. Devemos pontuar que o artigo em questão está muito longe de ser um exemplo da descrição deste fenômeno óptico. Algumas informações extremamente relevantes são escondidas do leitor e o texto faz menção à uma série de conceitos físicos ainda desconhecidos pelos estudantes.

Desta forma, o resultado da atividade posterior é encarado por nós como um exemplo do porquê não devemos pular etapas, isto é, dos motivos pelos quais é imprudente desconsiderar a importância do domínio dos modos de representação do conhecimento listados por Bruner.

Quando convidados a desenhar a trajetória percorrida pelo raio de luz no interior da gota de chuva usando os conhecimentos extraídos do artigo, os alunos apresentaram resultados que podemos considerar no mínimo curiosos. Eis alguns exemplos.

*Figura 48: Ilustrações (produzidas pelos estudantes) de suas hipóteses a respeito da trajetória percorrida pela luz dentro de uma gota de chuva.*



Fonte: o autor.

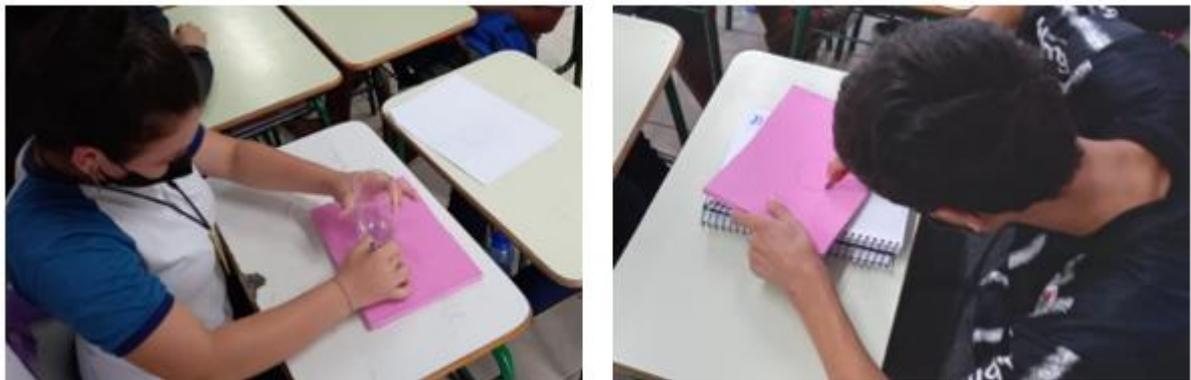
As ilustrações acima são quase que integralmente baseadas em suposições dos estudantes. O texto não apresentava nenhuma informação sobre a forma como a luz se comporta dentro da água. Não dizia se ela se propaga em linha reta ou em curva. Sem o devido fundamento, a hipótese dos estudantes foi mera especulação.

Desta forma, nosso objetivo passou a ser fazer com que o aluno conhecesse o fenômeno desde o nível mais simples de representá-lo. Seria apenas conhecendo as bases acerca da reflexão e da refração é que o estudante poderia explicar o arco-íris, desafio esse encarado como uma oportunidade para o indivíduo fazer uso do que Bruner chama de Poder Efetivo.

Iniciamos esse processo com a manipulação direta do fenômeno na Parte 03 do nosso material didático. Reunidos em grupos, os alunos realizaram o experimento descrito em detalhes nas páginas do fascículo. O produto educacional ainda contava com diversas ilustrações que poderiam guiar a equipe na realização da prática.

Faremos nossa análise desta etapa a partir de três parâmetros: as impressões particulares do professor registradas em seu “diário”, os resultados encontrados pelos grupos ao fim da experimentação e seus escritos na seção “Refleta & Responda” desta Parte 03.

*Figura 49: Alunos realizando a prática prevista na Parte 03 do produto educacional.*



Fonte: o autor.

O diário anteriormente citado é um registro próprio do professor destinado apenas para as aulas práticas da aplicação deste produto educacional. Sua função não é apenas fornecer dados para este projeto de pesquisa, mas também fundamentar ações que seriam tomadas em etapas posteriores. A existência destas anotações é considerada peça fundamental em nossa rotina de reflexão-ação enquanto docentes.

Este diário começou a ser utilizado na Parte 06 da primeira aplicação do produto educacional tendo como objetivo complementar os apontamentos dos alunos em suas manifestações escritas. Verificou-se que muito daquilo que era exposto verbalmente por eles no ambiente de aprendizagem acabava não aparecendo em seus escritos. Daí se justifica a necessidade deste diário.

A turma cuja aplicação do produto ocorreu em 2021 passou por dificuldades provenientes das restrições sanitárias anteriormente citadas. Pelas regras, os grupos não poderiam se juntar para trabalhar sobre uma mesma bancada, o que obrigava que cada integrante da equipe fizesse a sua parte do trabalho em sua mesa individual.

Além do tempo perdido com esta complicação e as dificuldades de comunicação entre os membros do grupo, algumas partes da experimentação tiveram de ser executadas pelo professor, enquanto os alunos apenas assistiam.

Todavia, os educandos das duas turmas pareceram entender bem a proposta e quase naturalmente foram incorporando alguns conceitos importantes de nosso estudo. O princípio da propagação retilínea dos raios de luz é um exemplo.

Quando solicitados a usar dois alfinetes - portanto, dois pontos - para traçar os raios que incidiam e saiam da gota, os estudantes consideraram discussão encerrada a respeito de como a luz se comportava em meios transparentes. Concluíram que se dois pontos definem uma reta e justamente dois pontos foram usados para representar os raios de luz, então a luz se propagaria em linha reta.

*Figura 50: Estudantes realizam o experimento proposto na Parte 03.*



Fonte: o autor.

Entre as dificuldades enfrentadas, destacamos a maior delas:

Os raios de luz que saiam do copo foram um fator de dúvida para muitos estudantes, que vinham até mim perguntar onde tinham que colocar os alfinetes. Os feixes emergentes da gota não formavam uma reta propriamente dita, já que se “espalhavam” na folha de papel. Tentamos melhorar um pouco movendo lateralmente a fonte de luz, mas mesmo assim, muitos raios foram marcados de forma equivocada. (DIÁRIO DO PROFESSOR).

Convém ressaltar a empolgação dos estudantes em cada etapa desta prática. Além de estarem empenhados nas atividades, uma evidência bastante pronunciada de sua motivação nesta etapa de aplicação do produto foi o número de perguntas que surgiam. É verdade que algumas delas não tinham relação direta com o que se

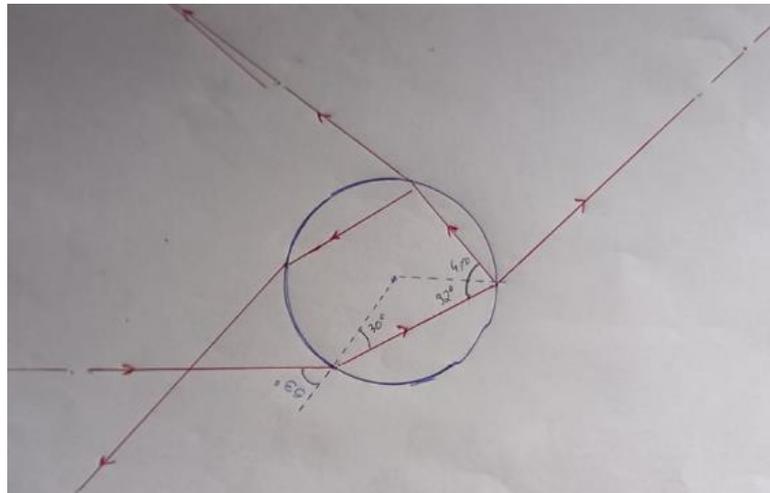
objetivava com o experimento, mas foram indícios importantes de que o ambiente de aprendizagem havia sido estabelecido naquela aula.

Os resultados desta primeira experimentação foram bastante bons: mesmo com as dificuldades descritas, os raios foram devidamente coletados e nenhum grupo - considerando as duas aplicações - incorreu em algum equívoco procedimental que inviabilizasse a prática.

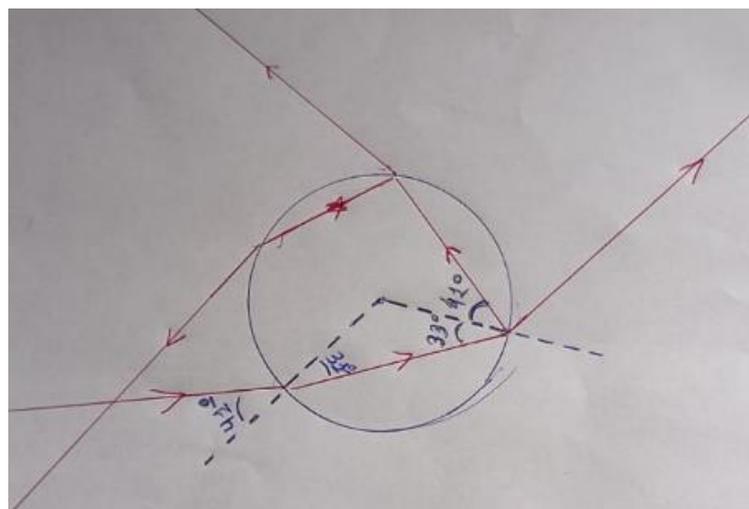
As imagens a seguir trazem alguns resultados coletados pelos grupos. É importante citar que os desenhos em questão já contam com a marcação de alguns ângulos, que são objetos de análise apenas da etapa 04. A justificativa para isso é que as fotos foram tiradas apenas após a conclusão da aplicação do produto educacional.

*Figura 51: Resultados obtidos pelos estudantes após a conclusão das Partes 03 e 04 do produto educacional.*

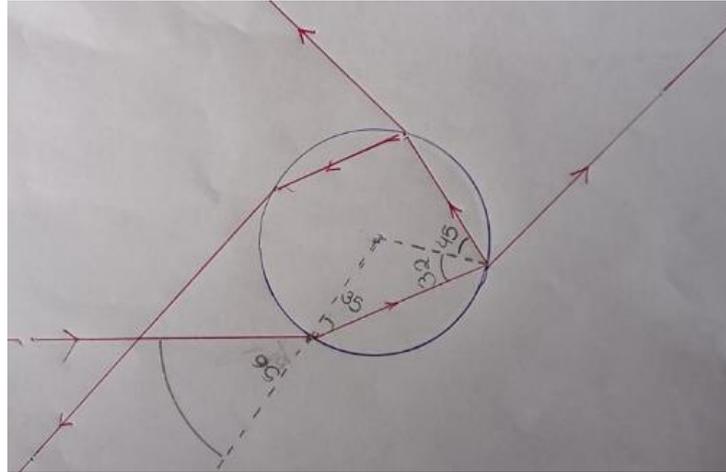
51a



51b



51c



Fonte: o autor.

Após realizar o experimento em grupos, os estudantes foram chamados a responder mais um “Reflita & Responda”, desta vez individualmente. Nele, o questionamento se apresentava no sentido de pedir ao aluno que descrevesse o comportamento do raio de luz dentro da gota.

O esperado era que o estudante, já ciente de alguns conceitos, descrevesse os processos pelos quais a luz passa no interior da gota circular utilizando parte desse conhecimento novo. Uma resposta “modelo” para este “Reflita & Responda” é do tipo: *A luz entra na água e sofre refração, desviando-se em relação à trajetória no ar. No interior da gota, o raio passa por sucessivas reflexões e sai novamente da gota. A cada reflexão a intensidade da luz diminui.*

Mais uma vez os alunos foram muito econômicos em suas respostas, mas a presença de algumas palavras revelou uma regularidade interessante. Um exemplo de resposta coletada foi: “Que a luz quando chega na gota de chuva ela começa tendo refração e depois tem a reflexão”. Muitos estudantes fizeram registros semelhantes, citando os fenômenos ópticos da reflexão e refração.

Quem corrobora a frequência destes termos é a nuvem de palavras construída a partir destes registros:

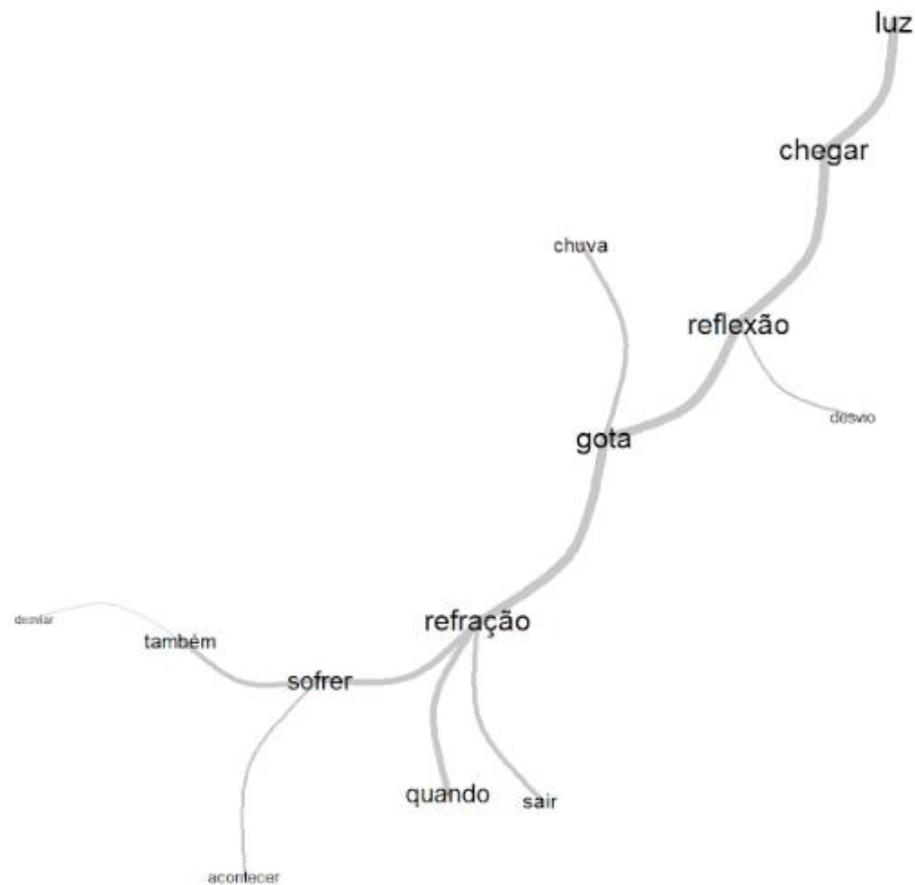
Figura 52: Nuvem de palavras relativa ao “Reflita & Responda” da Parte 03.

sofrer  
gota  
desviar  
sair desvio  
luz quando  
refração  
reflexão  
chegar também  
chuva  
acontecer

Fonte: o autor.

A rede de similitude produzida a partir das mesmas verbetes revela a conexão dos fenômenos ópticos (reflexão e refração) com a interação da luz com a gota de água. Os alunos também parecem compreender que tanto na reflexão quanto na refração a luz passa por desvios quando “chega”, “sai” ou permanece na gota.

Figura 53: Rede de similitude para o “Refleta & Responda” da Parte 03.



Fonte: o autor.

Por mais que a redução gradativa da intensidade da luz no interior da gota tenha sido motivo de comentários dos estudantes durante a prática, menções a este fato pouco apareceram em seus registros escritos.

De posse dos desenhos produzidos na Parte 03, iniciamos a etapa posterior com o objetivo de marcar alguns dos ângulos de incidência, reflexão e refração relacionados ao experimento. Com esta meta devidamente estabelecida, já esperávamos uma dificuldade na realização das medições com transferidor. Logo nos primeiros momentos, percebemos que muitos não se recordavam como utilizar este instrumento ou tampouco haviam feito uso dele na vida.

Desta forma, focamos parte de nosso trabalho em ensinar os estudantes a medir ângulos com transferidor. Tendo em vista que em nenhuma das duas aplicações houve aluno monitor, o próprio professor se dedicou a essa tarefa de atualizar os grupos sobre a utilização do instrumento de medida.

Convém destacar, contudo, que os grupos pareceram entender bem o que deveria ser feito e passaram a medir os ângulos sozinhos, sem o auxílio direto do

professor. O que antes era uma dificuldade que inviabilizava a prática prevista para esta Parte 04, logo se transformou em algo empolgante de ser realizado. Afirmamos isso após observar alguns alunos “competindo” para ver quem iria fazer uma ou outra medição. “Deixa que eu faço porque isso eu acho que sei fazer” foi uma frase dita em praticamente todas as equipes.

Sobre a reta normal, o diário do professor aplicador traz a seguinte consideração:

Alguns alunos parecem não ter compreendido bem a função da reta normal no estudo dos fenômenos ópticos. Um estudante chegou até a perguntar se aquela [reta] pontilhada era o raio refletido. A utilidade desta referência deve receber atenção especial na aula dedicada à exposição da teoria, programada para a Parte 05. (DIÁRIO DO PROFESSOR).

Ao fim da atividade, alguns estudantes de cada grupo vieram confirmar com o professor os resultados obtidos.

De maneira muito tímida já começamos a perceber que o vocabulário científico dos alunos tenha tido uma relativa melhora. Conforme registro feito no diário, durante as discussões entre os integrantes dos grupos já houve uso de termos como “raio refletido” e “refração”. Esta conclusão será corroborada pela nuvem de palavras e pela rede de similitude que serão expostas adiante.

As imagens dispostas na figura 51 já trazem os registros dos ângulos medidos por algumas das equipes, uma vez que estes foram marcados nos próprios papéis em que o desenho havia sido feito na etapa 03. Por medida de formalidade, registramos no Tabela 2 abaixo os ângulos de incidência (a primeira sobre a gota  $i$ ), de refração (a primeira no interior da gota  $r$ ), de incidência para a primeira reflexão interna  $i'$  e o ângulo de reflexão no interior da gota  $r'$ .

Tabela 2: Resultados obtidos pelos estudantes durante a realização da Parte 04.

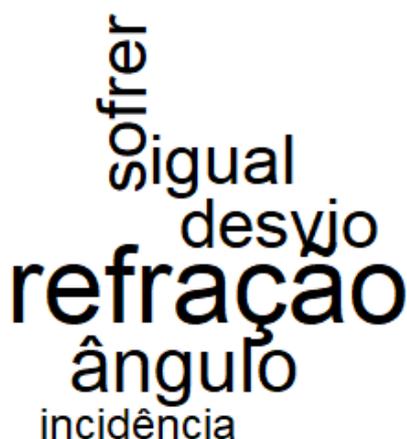
APLICAÇÃO	EQUIPE	$i$	$r$	$i'$	$r'$
2021	EQUIPE 1	72°	31°	49°	56°
	EQUIPE 2	50°	43°	40°	36°
	EQUIPE 3	57°	27°	26°	43°
2022	EQUIPE 1	53°	30°	32°	47°
	EQUIPE 2	41°	31°	33°	41°
	EQUIPE 3	56°	35°	32°	45°

Fonte: o autor.

A Parte 04 não traz nenhum “Refleta & Responda”. Ao Invés disso, os estudantes são solicitados a responder duas questões sobre o que podem concluir a respeito dos ângulos coletados a partir do experimento realizado.

Quando são convidados a responder o que ocorre com o raio de luz quando ele entra na gota de água, os educandos já demonstram entender como identificar o fenômeno da refração da luz. A nuvem de palavras adiante permite que especulemos um pouco sobre como o entendimento dos alunos a respeito deste fenômeno está evoluindo.

Figura 54: Nuvem de palavras relativa ao questionamento da Parte 04 do produto educacional.

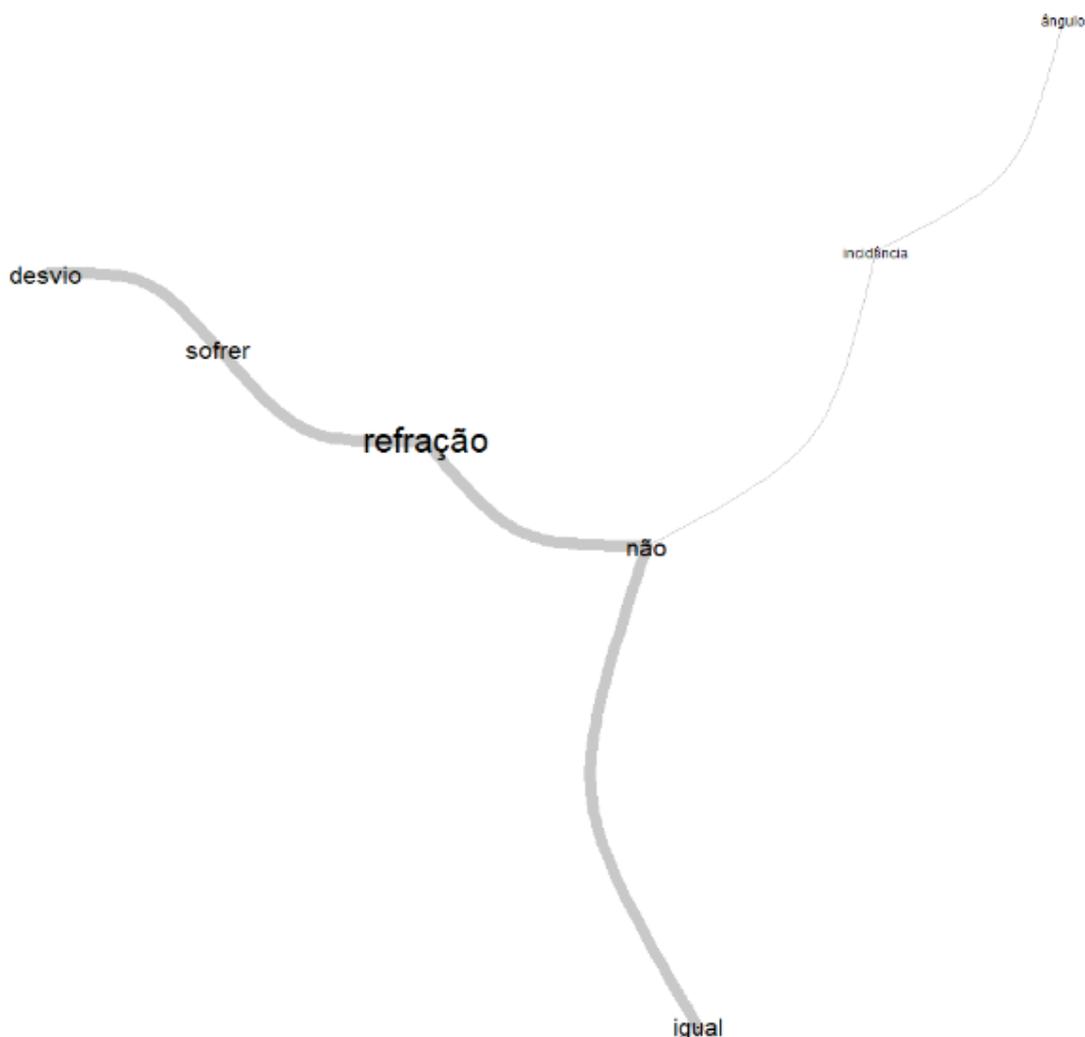


Fonte: o autor.

A palavra “refração” ganha destaque, ao mesmo tempo que a verbete “desvio” também tem importância. Alguns registros já dão conta de que os ângulos de incidência e refração não são iguais, já que esta é uma conclusão óbvia que o uso dos instrumentos de medida permite que seja tomada.

A rede de similitude corrobora esta nossa especulação.

Figura 55: Rede de similitude obtida a partir das respostas dos estudantes ao questionamento presente na Parte 04 do material instrucional.



Fonte: o autor.

Conforme podemos perceber, os estudantes se limitaram a descrever o primeiro fenômeno óptico pelo qual a luz passa ao trocar de meio material. Eles observaram através de suas medições que os ângulos de incidência e refração não são iguais. Registramos ainda que a palavra “incidência” aparece com pouca frequência nos registros dos alunos.

A parte 05 talvez tenha sido a etapa deste produto educacional que foi mais semelhante quando comparamos as aplicações de 2021 e 2022. Nesta oportunidade, nosso objetivo era dar corpo formal ao conhecimento que os alunos já vinham desenvolvendo a partir das atividades anteriores. Conforme já pontuamos, os estudantes demonstraram estar tomando posse de conceitos e modos de

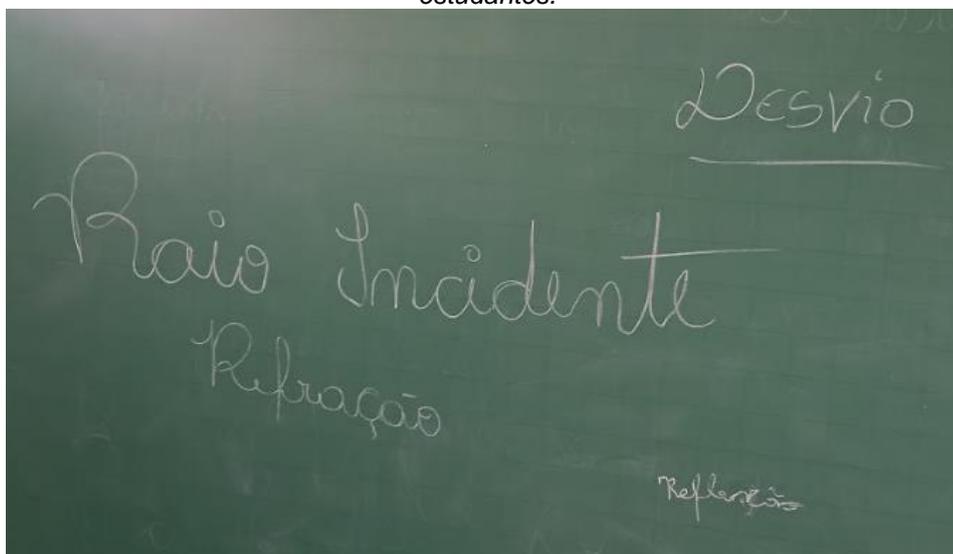
representação que são importantes para o estudo da óptica geométrica. Faltava, entretanto, proporcionar o processo de familiarização destes educandos com o conjunto de símbolos e códigos que são particulares desta área da física.

O número de aulas ocupadas para esta etapa de aplicação do produto foi de quatro encontros.

Uma vez que a ideia era proporcionar uma exposição dialogada com os estudantes a respeito daquilo que já vinha sido construído, os alunos foram convidados a participar de uma discussão inicial sobre os fenômenos de reflexão, refração da luz e formação do arco-íris. O vocabulário demonstrado pelos estudantes durante a conversa já se demonstrava mais desenvolvido e, para efeito de registro, alguns alunos foram solicitados a escrever o nome dos conceitos mais importantes (em seu julgamento pessoal) na lousa.

A figura 56 representa este momento inicial.

*Figura 56: Registros, em lousa, dos nomes dos conceitos mais importantes no julgamento dos estudantes.*



Fonte: o autor.

Após a entrega do fascículo “Parte 05”, os alunos realizaram a leitura do texto sobre reflexão da luz. Nele, os estudantes tiveram acesso ao conhecimento formal a respeito do fenômeno que foi observado nos experimentos das partes 03 e 04. Chamamos a atenção para o fato de que pelo menos três alunos, durante a aplicação em 2022, verbalizaram ter observado que o ângulo de reflexão medido no interior da gota não era igual ao ângulo de incidência, contrariando o que o texto do material didático trazia como informação.

Esta divergência foi discutida no momento posterior, em que a exposição do conteúdo foi realizada com o auxílio dos *slides* presentes no apêndice IV do produto educacional. O diálogo conduzido aqui visava conectar as informações do texto com o que foi visto na prática, elencando possíveis erros procedimentais e elaborando melhorias no que diz respeito à coleta de dados durante a realização do experimento.

Uma vez que os símbolos utilizados no estudo da reflexão da luz pareciam haver terem sido incorporados pelos estudantes, passou-se ao estudo da refração, que seguiu os mesmos moldes. Cabe aqui, entretanto, pontuar algumas dificuldades desse momento.

O uso de notação científica para expressar as velocidades da luz no vácuo e na água parece ter desmotivado os estudantes durante a leitura do fascículo. Além disso, tanto a turma de 2021 quanto a de 2022 pareciam não ter qualquer conhecimento a respeito do que era a função trigonométrica seno. Por conta desses entraves, a fase de desenvolvimento dos conteúdos na lousa teve de ser iniciada sem que a leitura estivesse finalizada para grande maioria dos estudantes. Estes reclamavam que “não estavam entendendo nada” do texto e se perdiam ainda mais em conversas paralelas totalmente indesejáveis para o contexto de nosso ambiente de aprendizagem.

Somente após muito esforço e retomada de assuntos que já deveriam ser de conhecimento dos educandos é que foi conduzida a aula sobre índice de refração e leis da refração. Mesmo com o desgaste produzido por um desvio que não estava inicialmente previsto no planejamento, havia motivo para comemoração: o procedimento de cálculo do índice de refração foi relativamente fácil para os alunos e observou-se que aqueles que haviam concluído essa tarefa auxiliavam os que se encontravam em dificuldade.

Infelizmente não houve tempo para que os estudantes realizassem a resolução dos exercícios de fixação presentes no final do fascículo. Esses exercícios foram introduzidos com o objetivo de avaliar se os códigos e símbolos aprendidos seriam suficientes para resolver questões que são frequentemente propostas pelo método tradicional.

Já na Parte 06, denominada “Explorando (novas) alternativas”, esperava-se ter uma confirmação de que o trabalho realizado, até este momento da aplicação do produto, estava logrando sucesso. Nela, os estudantes teriam acesso a um fascículo que traz os procedimentos para uma nova prática experimental; contudo,

diferentemente da maneira como foi conduzido na Parte 03, um menor número de detalhamento seria oferecido pelo texto. Isso obrigaria os estudantes a lembrar o nome dos conceitos e forma como eles se conectavam com a nova prática experimental.

O experimento em questão é muito semelhante ao que já havia sido realizado em etapas anteriores: faríamos incidir raios de luz em um copo circular com água e coletaríamos dados a partir do esquema construído. Entretanto, desta vez o feixe luminoso em questão viria de uma lanterna de luz branca (simulando a luz proveniente do Sol). Além disso, ao final da prática, os estudantes seriam convidados a obter o desvio angular sofrido pelo raio de luz ao passar pela gota de água.

Conforme registrado no diário do professor, os grupos encontraram relativa facilidade para montar as primeiras etapas do experimento. Eles se recordavam da montagem dos materiais e de como era realizada a coleta dos ângulos de incidência e refração utilizados no cálculo do índice de refração da água - atividade também prevista para esta fase.

Pelo que pude observar, os alunos lembravam que o raio incidente era o que chegava, o refratado era o que entrava e também da necessidade da reta normal. Notei que alguns alunos consultaram os fascículos anteriores para lembrar quais eram os ângulos que precisavam ser marcados. (DIÁRIO DO PROFESSOR).

É importante destacar, entretanto, algumas dificuldades que os educandos enfrentaram durante a prática. A primeira delas diz respeito à marcação do ponto em que ocorre a primeira reflexão interna na gota (e a primeira refração para fora dela). A sombra proveniente da presença dos alfinetes que representavam o raio incidente na circunferência do copo era pouco nítida e, por conta disso, foi um desafio bastante demorado para realizar a marcação necessária. Encontrar a posição correta deste ponto era importante, tendo em vista que um equívoco aqui representaria novamente uma divergência com uma das leis da reflexão. Pelos dados coletados neste momento da aplicação do produto, temos indício de que não houve o cuidado necessário com a marcação deste ponto.

*Figura 57: Aluno realiza a marcação dos ângulos durante a Parte 06 da aplicação do material instrucional.*



Fonte: o autor.

Como já foi dito, algo novo previsto para esta etapa era que os estudantes demonstrassem seu poder efetivo e determinassem o desvio sofrido pelo raio de luz ao passar pela gota. Não há no fascículo nenhuma instrução para que os alunos realizem esse processo, o que os obrigaria a raciocinar sobre o que a palavra “desvio” significa e tomar atitudes que permitam determinar esse ângulo.

A respeito disso, registramos:

Já imaginava que a determinação do ângulo de desvio seria uma dificuldade das equipes. Alguns alunos acreditavam que o desvio era o ângulo formado entre o raio incidente e o raio refratado para dentro da água. Outros tentavam usar o transferidor para medir o ângulo entre o raio de incidência e o raio proveniente da primeira refração para fora da gota. Apenas um grupo discutiu e concluiu corretamente a respeito de qual seria o ângulo a ser aferido pelo transferidor. (DIÁRIO DO PROFESSOR)

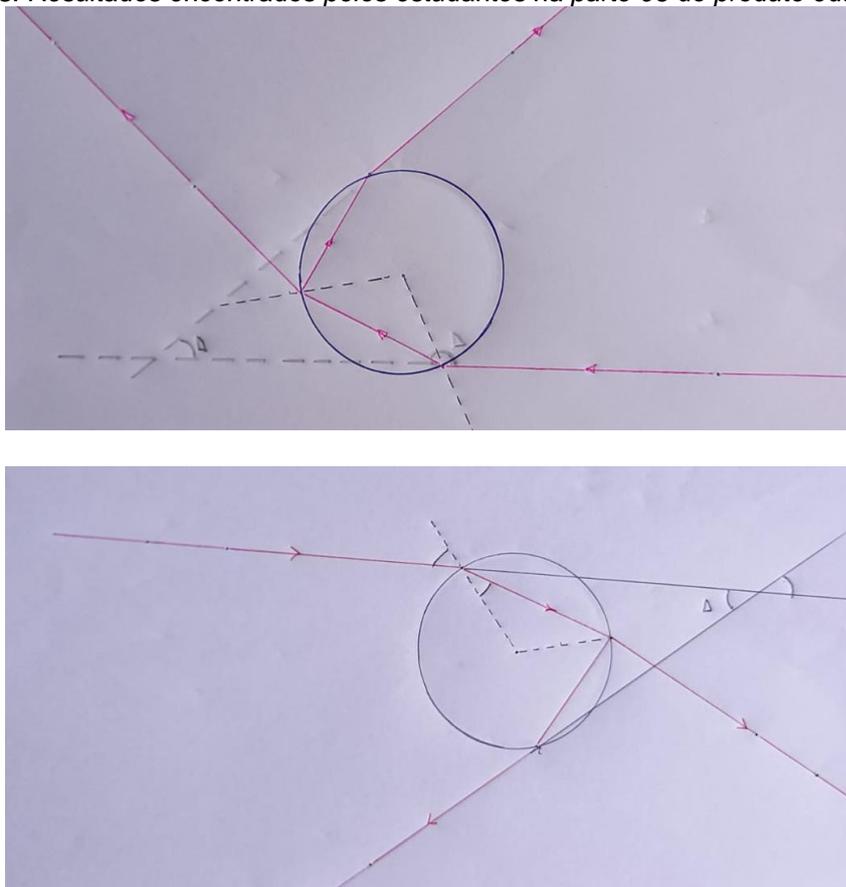
Os grupos que estavam equivocados foram corrigidos pelo professor e induzidos, através de perguntas, a encontrar o ângulo correto. A medição e o registro deste desvio angular foram realizados de maneira individual em cima do trabalho produzido por suas equipes. Verificamos certa divergência dos resultados medidos por eles, uma vez que para o mesmo esquema, valores diferentes foram encontrados. Contudo, em sua maioria, o valor do desvio ficou dentro do intervalo previsto pela teoria.

Consultando os fascículos anteriores e/ou contando com o auxílio dos colegas, a maior parte dos alunos foi capaz de aplicar a lei de Snell-Descartes para determinar o índice de refração da água.

A média dos valores de desvio angular e índice de refração coletados e calculados pelos estudantes foram, respectivamente,  $41,2^\circ$  e 1,32.

As imagens abaixo são alguns exemplos dos esquemas construídos pelos grupos nesta etapa de aplicação do produto educacional. É conveniente notar que não há valores de ângulos marcados, tendo em vista que estes dados foram registrados individualmente nos fascículos dos próprios educandos que participaram da prática.

*Figura 58: Resultados encontrados pelos estudantes na parte 06 do produto educacional.*



Fonte: o autor.

A Parte 07 foi executada de maneiras distintas nas turmas de 2021 e 2022. No primeiro caso, em virtude da ausência de sinal de internet na sala de aula e da impossibilidade prática de se utilizar a sala de informática, o manuseio do *software* teve de ser feito pelo próprio professor. Tornou-se uma aula expositiva dialogada, com pouca participação dos estudantes durante as discussões.

Em 2022, todavia, os estudantes puderam utilizar seus aparelhos celulares para o estudo do simulador e alcançaram os resultados esperados com relativa facilidade. De acordo com o que registramos no diário, alguns alunos ficaram curiosos a respeito dos motivos pelos quais, mesmo mantendo o meio pelo qual a luz se propagava, tanto o ângulo quanto o índice de refração se alteravam quando a cor mudava. A explicação dada foi no sentido de destacar a natureza ondulatória da luz e suas características - tais como frequência e comprimento de onda - e como elas interferem nos fenômenos estudados. Os educandos foram alertados de que este será um estudo realizado *a posteriori*, em que novos detalhes serão adicionados a esse corpo de conhecimentos.

Após finalizar as atividades propostas pelo fascículo, os alunos foram solicitados a responder mais um “Refleta & Responda”. Nele, eles teriam de concluir sobre a forma que a luz branca se refrata quando muda de meio de propagação. Fazia parte das expectativas que os estudantes utilizassem o vocabulário que vinha sendo construído até esta etapa da aplicação do produto educacional.

Destacamos aqui uma resposta dada por um dos alunos: “(...) A luz branca se divide nas sete cores do arco-íris quando entra na água. O índice de refração é diferente para cada cor e o ângulo também é diferente”. O “ângulo” ao qual o estudante se refere é o de refração. Este registro nos parece bastante interessante para mensurar a efetividade do projeto proposto: ele contempla termos (códigos/símbolos) que fazem parte do estudo em questão e eles são aproveitados para representar o conhecimento desenvolvido.

A nuvem de palavras abaixo tem origem a partir do compilado das respostas ao “Refleta & Responda” desta Parte 07.

Figura 59: Nuvem de palavras relativas ao “Refleta & Responda” da Parte 07.

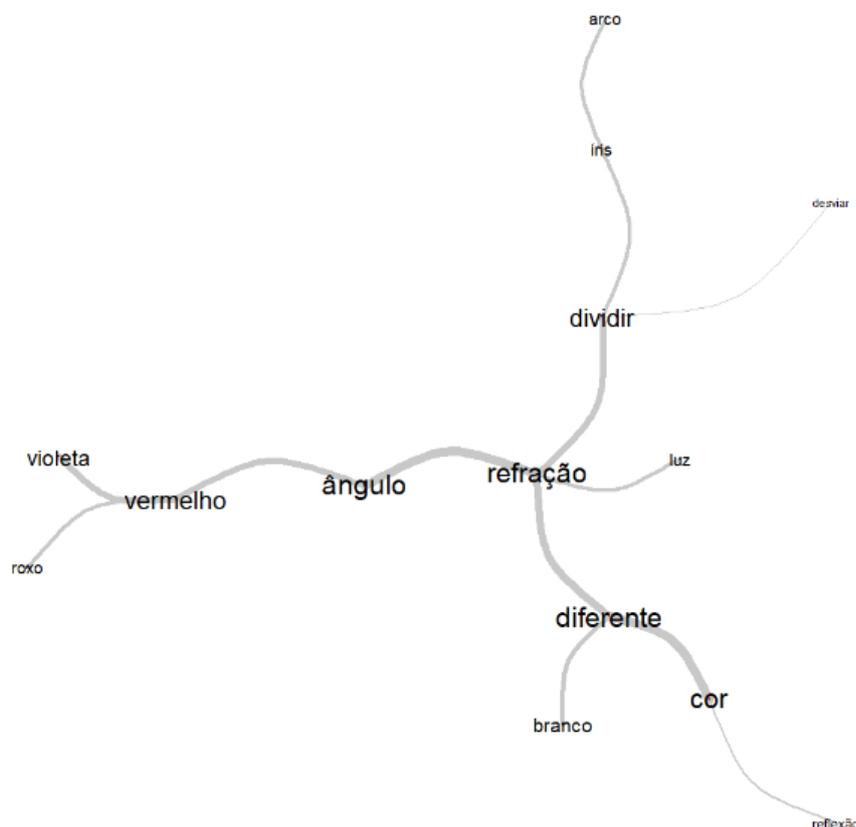


Fonte: o autor.

Podemos observar que algumas palavras receberam destaque nos registros dos estudantes. São alguns exemplos: “Refração”, “ângulo” e “diferente”. Isto é, podemos concluir que os alunos realmente observaram que o ângulo de refração se altera para a luz cuja cor é o “vermelho” e para quando a luz é “violeta”/“roxo”. “Branco” e “dividir” também aparecem - em frequência menor, é verdade -, denotando que alguns estudantes foram mais completos em suas respostas quando relacionaram o fenômeno da refração à decomposição da luz branca.

A rede de similitude abaixo confirma algumas de nossas hipóteses. A partir dela, podemos notar que “refração” é o conceito central e a ele se associam verbetes como “diferente”, “ângulo” e “dividir”. Ou seja, pelo fato de o ângulo de refração ser diferente para as cores vermelha e violeta é que ocorrerá a divisão (o termo correto aqui seria “decomposição”) da luz branca no espectro visível colorido conhecido.

Figura 60: Rede de similitude produzida a partir das respostas dos estudantes ao “Refleta & Responda” da Parte 07.



Fonte: o autor.

Realizar um fechamento teórico era o grande objetivo da parte 08 da aplicação de nosso produto educacional. Após receber os fascículos da etapa em questão, iniciou-se uma discussão a respeito dos tópicos explorados no encontro anterior. Guiados pelos questionamentos do professor, os alunos verbalizaram seus conhecimentos já construídos sobre a refração sofrida pela luz branca ao incidir sobre uma gota de chuva.

É conveniente destacarmos que nesta conversa inicial, os estudantes utilizaram termos que estavam de acordo com o sistema de códigos cientificamente aceito na área de estudo da óptica. Termos como “refração” e “desvio” apareceram com uma frequência bastante satisfatória nas falas dos alunos que se dispuseram a participar da discussão.

É necessário pontuar que nem todas as contribuições orais dadas pelos estudantes contavam com a utilização do vocabulário correto que almejamos. Outras, por sua vez, insistiam em confundir os fenômenos da reflexão e da refração. Nestas ocasiões, foi realizada a correção necessária de imediato no sentido de direcionar

questionamentos ao aluno para que percebesse que sua observação não era realmente o fenômeno verbalizado por ele.

Em seguida, desenvolveu-se uma aula expositiva dialogada que contou com o auxílio dos *slides* presentes no apêndice do produto educacional. É importante destacar que toda a explicação do conteúdo levou em conta os experimentos realizados durante as etapas 03, 04 e 06, com o docente sempre fazendo menção aos resultados encontrados pelos estudantes. O “diálogo” que se observou teve início com questionamentos feitos pelo professor no sentido de fazer com que os estudantes se lembrassem da prática experimental e verbalizassem respostas. Foi justamente a partir de suas falas que o desenvolvimento do conteúdo se deu, buscando sempre a comparação do que dizia a teoria cientificamente aceita com aquilo que foi obtido nos encontros anteriores.

Para exemplificar, um momento relevante a ser destacado ocorreu quando o ângulo de visualização do arco-íris primário foi citado pelo professor. No mesmo momento, alguns alunos retornaram às suas pastas em busca do fascículo Parte 07, que continha a anotação a respeito do ângulo medido por eles durante a prática. “O meu [ângulo] ficou bem próximo do valor certo” foi um exemplo de frase escutada durante esse estágio da aula.

De maneira breve, a teoria a respeito do arco-íris secundário foi citada pelo professor. Neste momento, os alunos afirmaram lembrar da existência de um segundo feixe de luz colorida que emergia do copo na prática da Parte 06. Outros ainda diziam se lembrar que nas imagens expostas na Atividade I da Parte 01 havia um arco-íris “duplo”.

Para reforçar os conteúdos organizados nesta etapa de aplicação de nosso produto educacional, os estudantes tiveram acesso a uma bateria de exercícios de múltipla escolha ao final do fascículo.

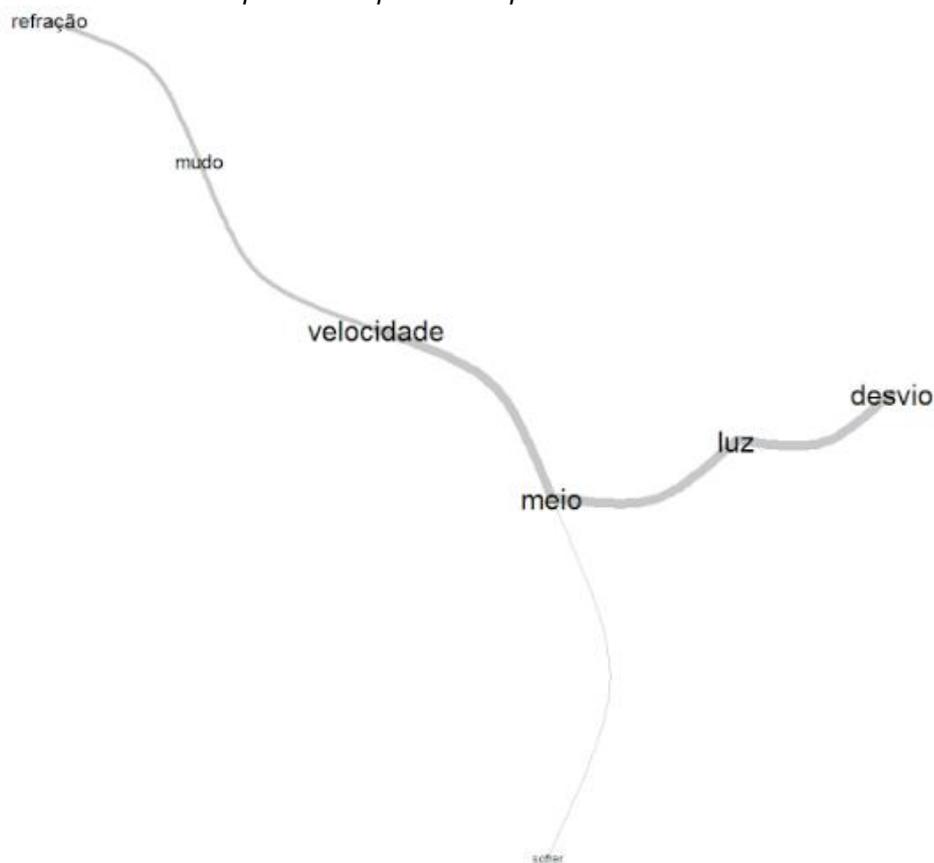
O processo de aplicação do produto educacional chega ao fim com a entrega da Parte 09 aos estudantes, que é composta de um questionário de verificação que alterna questões de múltipla-escolha e abertas, além de possuir também um exercício que pede a representação esquemática dos raios de luz no interior da gota de água. Mais uma vez, destacamos que a opção por inserir o questionário final é uma forma de avaliar se nosso produto é capaz de produzir aprendizado para a solução de problemas que são comumente abordados pelo método tradicional

A questão 1 alcançou a marca de 100% de acerto nas duas aplicações. Nela, os alunos teriam de identificar e diferenciar os fenômenos de reflexão e refração da luz que estavam ilustrados em uma imagem. Este excepcional resultado, entretanto, não é uma surpresa para nós, tendo em vista que as especificidades da representação de cada um destes fenômenos já pareciam ser bem conhecidas desde as etapas 04 e 05.

Já a questão 2 exigia um pouco mais de conhecimento técnico dos estudantes a respeito dos detalhes conceituais do fenômeno da refração luminosa. Pelo fato de ser uma questão aberta e não haver espaço para a consulta durante a realização desta atividade, os estudantes foram bastante econômicos em suas descrições.

A rede de similitude abaixo confirma a relação entre as palavras mais recorrentes nos registros escritos dos educandos.

Figura 61: Rede de similitude para as respostas da questão 2 da Parte 09 do material instrucional.



Fonte: o autor.

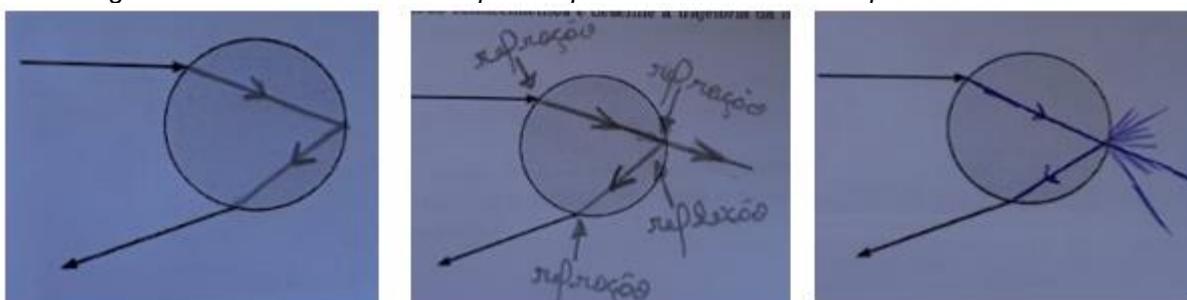
Chama a atenção a presença do verbete “velocidade”, o que demonstra que os alunos se recordam bem da Atividade II da Parte 01 de nosso material, em que observaram a partir do simulador que a velocidade da luz do raio refratado era diferente da do raio incidente.

Como era de se esperar, além da mudança da velocidade da luz quando esta muda de meio material, os estudantes também destacaram o desvio sofrido pelo raio luminoso - observação tão frequente durante as práticas experimentais e que causaria estranheza caso fosse ausente nas respostas desta questão.

Mesmo que de maneira tímida, os registros feitos pelos alunos são interessantes no sentido de provar que houve apreensão de alguns termos importantíssimos para o vocabulário científico. Ao comparar com o início do processo de aprendizagem, lembramos que estes mesmos indivíduos sequer conheciam a palavra “refração”. No fechamento, eles não apenas conhecem o fenômeno, como também sabem diferenciá-lo da reflexão (mais conhecida desde antes do início da aplicação do produto) e têm compreensão de quais são suas principais características.

De modo a investigar se os estudantes dominavam a representação icônica do conhecimento que vem sendo construído, a questão 3 foi uma repetição de uma atividade feita ainda na Parte 02. Naquela ocasião, os alunos tiveram de fazer hipóteses a respeito do comportamento de um raio de luz dentro da gota de chuva a partir das informações extraídas por um artigo de ciências. Desta vez, entretanto, eles já realizaram experimentos que os permitem conhecer a trajetória percorrida pelo raio luminoso nesta situação. O espaço abaixo é dedicado para compilar alguns dos resultados coletados nesta etapa.

*Figura 62: Resultados coletados para a questão 3 da Parte 09 do produto educacional.*



Fonte: o autor.

Todos os estudantes representaram o comportamento interno do raio de luz de maneira correta, variando entre eles em maior ou menor grau de detalhamento.

Como é possível observar, alguns alunos foram mais completos em seus esquemas e desenharam até mesmo o raio de luz que emerge à direita da gota, fruto da primeira refração para fora da água. Outros, por sua vez, escreveram o nome do fenômeno físico (refração ou reflexão) ao lado de seus desenhos - o que denota não

apenas a apreensão das formas de representação icônicas, como também das simbólicas, que sequer eram alvo do que buscávamos nesta questão.

Comparar os resultados desta atividade com aqueles que foram encontrados na Parte 02 demonstra a validade da teoria instrucional que adotamos em nosso referencial teórico. Na ocasião anterior, os estudantes tiveram acesso primeiro aos símbolos e códigos, para só depois representar a partir de desenhos. O resultado disso, já conhecido, foi muito longe do que é a realidade estabelecida pelo modelo de descrição do arco-íris apresentado pela física clássica. Desta vez, contudo, o grupo passou por todo o processo de maneira sequencial (ativo, icônico e simbólico, nesta ordem) e obtivemos uma resposta bastante satisfatória de acordo com o referencial teórico adotado e citado ao longo deste capítulo.

De modo a traduzir o conhecimento representado de maneira icônica anteriormente, a questão 4 tinha por objetivo que os alunos fizessem a descrição do fenômeno estudado. Nesta etapa do processo, os estudantes alcançaram um resultado bastante satisfatório. Como se verá adiante, eles não só fizeram uso do vocabulário correto, como também manifestaram as diferenças entre um fenômeno e outro e como eles se articulam para a formação do arco-íris.

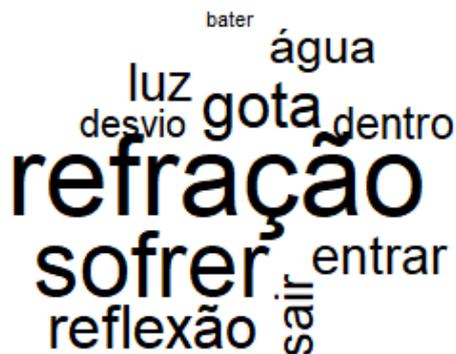
Uma vez que consideramos essa a questão mais importante de todas, boas respostas nessa etapa dão indícios que após passar por uma série de momentos cuidadosamente estruturados e sequenciados, o aluno é capaz de progredir entre os modos de representação de um conhecimento para, então, alcançar seu poder efetivo.

Consideramos uma boa resposta (ou “ideal”) algo como *“Inicialmente a luz proveniente do Sol sofre refração ao entrar na água. Após desviar-se de sua trajetória original, esta luz reflete no interior da gota para, por fim, refratar novamente para o ar”*. Qualquer menção à primeira refração ocorrida ou à dispersão luminosa já seria encarada como uma informação complementar e digna de muita celebração. Convém destacar, ainda, que a referida questão não é um balanço de todo o conteúdo explorado no produto educacional, mas sim de um recorte que contempla o reconhecimento dos fenômenos envolvidos na formação do arco-íris.

“A luz do sol chega na gota sofre uma refração, em seguida sofre um desvio aí sofre uma reflexão dentro da água ela dá um desvio e sai da água para o ar com uma refração” foi uma das descrições coletadas. Muitas outras respostas foram semelhantes a esta.

A nuvem de palavras abaixo foi produzida a partir das transcrições das respostas dos estudantes.

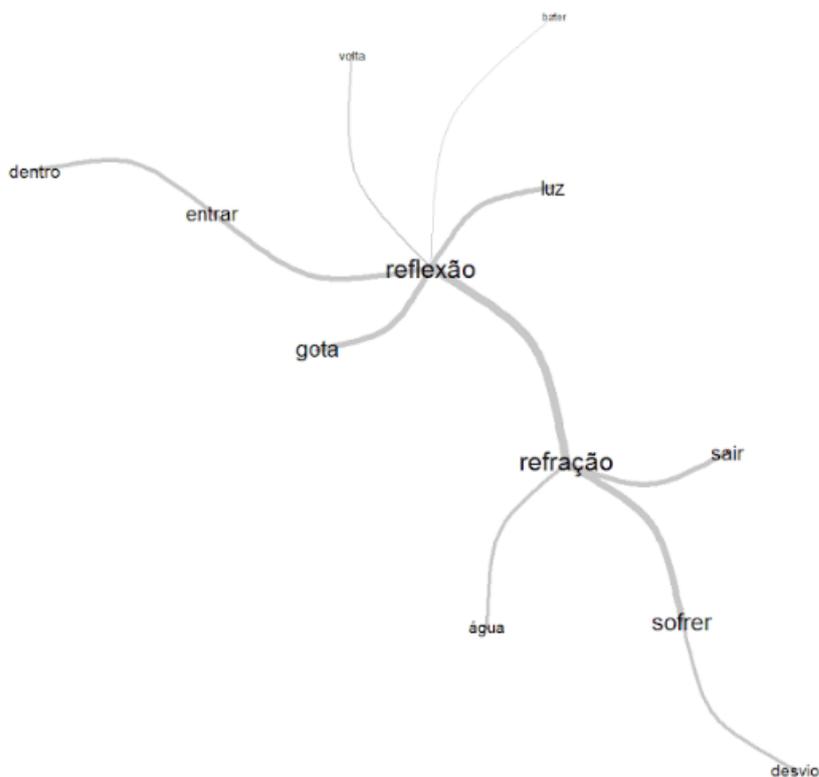
Figura 63: Nuvem de palavras relativa à questão 4 da Parte 09 do material instrucional.



Fonte: o autor.

Já a rede de similitude, produzida a partir das mesmas palavras, está exposta na sequência.

Figura 64: Rede de similitude para a questão 4 da Parte 09.



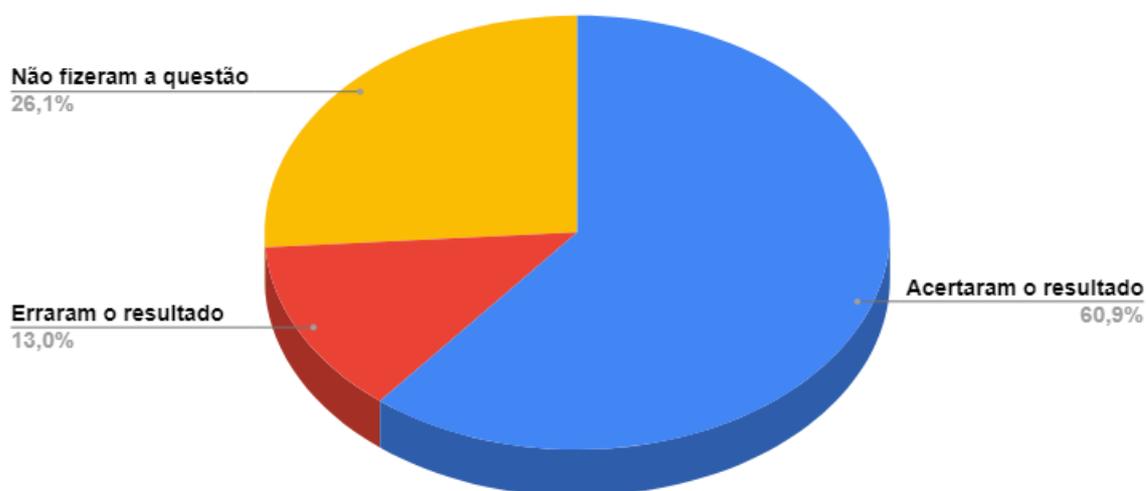
Fonte: o autor.

Como somos capazes de observar, podemos dizer que verbetes “reflexão” e “refração” quase que compartilham a posição de termo principal. É possível notar que os estudantes relacionam a reflexão com o fenômeno que acontece no interior (“dentro”) da gota, enquanto a refração está mais relacionada com a mudança de um meio material para o outro e conseqüente desvio da trajetória da luz.

A questão 5, por sua vez, finalizava o questionário e seu objetivo era atestar se os alunos dominavam o sistema de símbolos inato ao estudo da refração. Com base em alguns dados presentes no exercício, os estudantes eram convidados a calcular o índice de refração da água. Convém destacar que a equação estava escrita na lousa e era permitido o uso de calculadora. Uma vez mais, destacamos que esses exercícios objetivavam avaliar se os códigos e símbolos aprendidos seriam suficientes para resolver exercícios de fixação que são comumente propostos pelo método tradicional.

Os resultados obtidos nesta questão 5 estão representados através do gráfico abaixo.

*Figura 65: Representação gráfica dos resultados das respostas dadas à questão 5 da Parte 09 do produto educacional.*



Fonte: o autor.

De maneira geral, podemos notar que os resultados alcançados pelos estudantes estão em conformidade com aquilo que pretendíamos no início do processo de aprendizagem. Esta é uma constatação possível de ser observada não só a partir das respostas às questões da Parte 09, mas também daquilo que foi produzido durante todo o período de aplicação da sequência didática.

O grau de efetividade deste produto ainda pode sofrer variações a depender do contexto em que ele é aplicado - circunstâncias estas que irão merecer atenção especial no capítulo "Considerações Finais" - e, por conta disso, incentivamos seu uso em sala de aula por outros professores, em diferentes escolas e para uma diversidade maior de alunos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do material instrucional em sala de aula nos permitiu concluir a respeito de alguns aspectos importantes para o trabalho de um professor de Física no ensino médio. Vamos destacar aqui neste último capítulo algumas destas conclusões.

A primeira delas diz respeito ao fato de que o ensino de física (e de outras áreas das ciências, de maneira extensiva) tem de ser bem estruturado e deve atender a uma sequência que obedeça à evolução que o estudante passa por entre as formas de representação de um conhecimento. Como foi possível observar ainda na Parte 02, os estudantes não reagiram bem a uma inversão da ordem estabelecida pela teoria instrucional de Jerome Bruner, em sua maioria sendo incapazes de traduzir os símbolos presentes em um texto para uma representação esquemática. Ao final do processo, por sua vez, em que a ordem foi reestabelecida, os estudantes lograram mais êxito na execução da tarefa, aproximando-se do que desejávamos avaliar desde o início da aplicação do produto. Convém destacar, no entanto, que somos cientes que esse resultado pode configurar um processo mecânico ou de tentativa e erro, que é inerente do ensino.

Destacamos também a importância da prática experimental no contexto do ensino de ciências. Durante os experimentos, notamos lacunas na formação dos nossos estudantes, que não sabiam manusear um instrumento de medida simples como um transferidor. É só a partir desse tipo de atividade que somos capazes de identificar esses problemas e atuar para solucioná-los sem passar pela experiência - muitas vezes traumática - das provas e listas de exercícios avaliativos. A própria disposição da sala, organizada segundo um ambiente de aprendizagem, favorece que o estudante se sinta mais confortável para buscar sanar suas dificuldades, seja com o auxílio do professor ou dos próprios colegas de classe.

Outro aspecto que a utilização deste material instrucional permitiu que fosse avaliado é a possibilidade de se seguir uma abordagem alternativa que contemple os conteúdos de física presentes nas ementas dos documentos oficiais. Em substituição à sequência bastante engessada na qual os fenômenos ópticos são estudados no ensino médio, nosso produto oferece um fenômeno a ser estudado - “Como se forma o arco-íris?” - que carece necessariamente da apreensão de conhecimentos anteriores. Estes conhecimentos, que são trazidos pelo próprio material didático, surgem como uma necessidade para que os alunos possam responder à pergunta

feita inicialmente. Isto é, fica estabelecida uma motivação para que a turma prossiga em seus estudos até que a dúvida inicial seja plenamente respondida.

Ademais, não podemos deixar de pontuar a importância que os registros escritos têm para o processo de aprendizagem. Segundo nossos referenciais de ensino, escrever em uma folha de papel as conclusões tiradas a partir de uma experiência prática é uma forma de criar o Conhecimento Real Exterior. Levamos isso a sério durante o planejamento e a execução do material instrucional, já que é possível observar que quase todas as etapas envolvidas contavam com questões abertas que obrigavam os estudantes a expor o conhecimento momentaneamente presente em suas mentes.

Para fechar, é crucial avaliar como a aplicação do produto educacional foi afetada pela pandemia do COVID-19 que assolou o mundo entre os anos de 2020 e 2022. A concepção e execução deste trabalho tiveram fortes influências deste período, tendo em vista que o projeto ficou “parado” até que nos sentíssemos seguros para colocar em prática o que havíamos pensado. Uma vez iniciado, parte cruciais do planejamento inicial tiveram de ser reformuladas para que atingíssemos nossos estudantes da maneira esperada sem sair ou tangenciar a fundamentação teórica do nosso trabalho.

Os alunos que retornaram do ensino remoto apresentaram enormes dificuldades em aspectos simples da vida cotidiana em sala de aula. Escrever e calcular operações básicas são alguns exemplos que destacamos. Em alguns casos, nos assustamos com a completa ignorância a respeito de conceitos triviais ou com a incapacidade de traduzir em palavras escritas os pensamentos que eram expostos oralmente. Em um trabalho extremamente dependente dos registros escritos, a utilização de poucas palavras empreendida pelos estudantes em suas produções foi um fator de preocupação.

Daí surge a importância de se insistir com este trabalho à medida que os efeitos da pandemia sejam abrandados. E o contexto é favorável, já que o Novo Ensino Médio estabelecido no Brasil vem com o imperativo de que o aluno deve ser alçado ao posto de protagonista de seu processo de aprendizagem. Os resultados deste trabalho nos fazem acreditar que é isso que nosso produto educacional faz ao organizar a forma como os conhecimentos serão apresentados ao estudante.

## REFERÊNCIAS

BARROS, Marcelo Alves; CARVALHO, Anna Maria Pessoa. A história da ciência iluminando o ensino de visão. **Ciência & educação**, Bauru, v. 5, ed. 1, p. 83-94, 1998.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério de Educação e Cultura. **PCNs + ensino médio. Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC-SEMTEC, 2002. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>> Acesso em: 15/02/2021.

BRUNER, Jerome S. **Sobre o Conhecimento**: Ensaio de mão esquerda. 1. ed. aum. São Paulo: Phorte, 2008. 208 p.

BRUNER, Jerome. **Sobre a teoria da instrução**. 1. ed. São Paulo: Ph editora, 2006. 172 p. ISBN 85-99860-05-4.

CRUZ, Gerson K. **A criação do conhecimento real exterior**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2016. 169 p.

CRUZ, Gerson Kniphoff. **Ambiente de Aprendizagem**: uma necessidade. Orientador: Márcia Andréa Schmidt da Silva. 2019. 27 p. Trabalho de conclusão de curso (Pós-graduação) - Pontifícia Universidade Católica - RS, Porto Alegre, 2019.

FERREIRA, Kelly Araújo; ANGELI, Mirian; DE SOUZA, Maria Alice Veiga Ferreira (Org.). Jerome Seymour Bruner: Cognitivismo em ação. *In*: DE SOUZA, Maria Alice Veiga Ferreira; SAD, Ligia Arantes; THIENGO, Edmar Reis. **Aprendizagem em diferentes perspectivas**: uma introdução. 1. ed. Vitória, ES: Ifes, 2015. v. 1, cap. 2, p. 45-68. ISBN 978-85-8263-105-8.

FLYNN, C. **What makes a rainbow? An explanation of atmospheric optical phenomena**. 2016. Disponível em: <https://blog.metservice.com/atmospheric-optics>. Acesso em: 11 março 2021.

GAUTÉRIO, Vanda Leci Bueno; RODRIGUES, Sheyla Costa. Os Ambientes de Aprendizagem possibilitando transformações no ensinar e no aprender. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, Brasília, v. 94, n. 237, p. 603-618, 20 ago. 2013.

GIRCOREANO, José Paulo; PACCA, Jesuína Lopes de Almeida. O ensino da óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno catarinense de ensino de física**, Florianópolis, v. 18, n. 1, p. 26-40, abr 2001.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Óptica e física moderna**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 400 p. v. 4.

KLAMT, Luciana Maria; SANTOS, Vanderley Severino. O uso do software IRAMUTEQ na análise de conteúdo: estudo comparativo entre os trabalhos de conclusão de curso do ProfEPT e os referenciais do programa. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 1-15, 31 mar. 2021.

MENEZES, Luana Paula Goulart de *et al.* Um olhar científico para o arco-íris. **Revista Pontes**, Paranaíba, v. 6, p. 96-110, 10 nov. 2019.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EDU, 1999.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Ótica, relatividade, física quântica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1998. 437 p. v. 4.

POLYANSKIY, M. N. **Refractive index database**. 2008. Disponível em: <https://refractiveindex.info>. Acesso em: 21 mar. 2021.

SILVA, Adriano Aparecido da. **Crônicas da luz: Uma breve história da óptica**. Orientador: Newton Martins Barbosa Neto. 2006. 36 p. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em física) - UFU, Uberlândia, 2006.

SILVA, Alisson Henrique; GOMES, Luciano Carvalhais. A teoria de aprendizagem de Bruner e o ensino de ciências. **Arquivos do MUDI**, Maringá, v. 21, n. 03, p. 13-24, 12 dez. 2017.

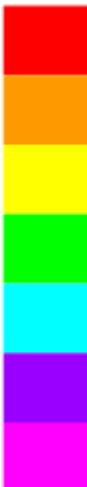
SOUSA, Yuri Sá Oliveira. O Uso do Software Iramuteq: Fundamentos de Lexicometria para Pesquisas Qualitativas. **Estudos e Pesquisas em Psicologia**, Rio de Janeiro, n. 21, p. 1541-1560, 1 jan. 2021.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

ZILIO, Sérgio Carlos. Ótica: Uma visão histórica. *In*: USP. **E-Física: Ensino de física online**. São Paulo, 21 jun. 2007. Disponível em: <http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/historico/intro/>. Acesso em: 15 fev. 2021.

## **APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL**

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

A vertical bar on the left side of the title, composed of six horizontal segments of different colors: red, orange, yellow, green, cyan, and magenta.

# CONHECENDO O ARCO ÍRIS

Gabriel Roberto Garcia Levinski (autor)  
Gerson Kniphoff da Cruz (orientador)

Ponta Grossa  
Fevereiro de 2022

**Caro leitor,**

Este material se propõe a ser muito mais do que o seu próprio nome sugere. Conhecer o arco-íris é algo que julgamos ser importante, mas acreditamos que o caminho para atingir este objetivo é ainda mais.

Dominar conceitos como a reflexão, a refração e a dispersão da luz branca são apenas algumas das etapas deste processo. Estes surgem como fundamentação para entender como se forma o belo arco que aparece nos céus vez ou outra.

Mas vamos além: queremos construir estes conceitos a partir da experimentação, da simulação e da discussão a respeito de seus princípios e leis. Com isso, estamos determinados a reproduzir o trabalho de um cientista em seu laboratório, passando pelo reconhecimento do fenômeno, elaboração de hipóteses e realização de testes para confirmá-las ou não.

“Conhecendo o arco-íris” está organizado em fascículos que serão distribuídos aos poucos. Será sua missão reunir cada um destes capítulos e seguir a sequência até que seja atingida a coerência do corpo de conhecimentos que queremos dominar. Nós, autores do material, buscamos oferecer uma estrutura que tenha como diretriz simplificar o conteúdo ao mesmo tempo que permite ao leitor avançar em seus estudos.

Mas este não é um caminho de mão única. Para que tudo isso funcione, é necessário que você tenha predisposição para aprender, isto é, tenha vontade de explorar as alternativas que surgirem no meio do processo.

É importante que você vislumbre que, por mais que esse material seja uma composição de pequenos capítulos, o resultado final deverá ser muito mais do que a simples soma das partes.

Gabriel Roberto Garcia Levinski (autor)  
Gerson Kniphoff da Cruz (orientador)

**SUMÁRIO**

COMO FUNCIONA ESTE MATERIAL?	128
FENÔMENOS ÓPTICOS	129
A LUZ DO SOL E A GOTA DE CHUVA	134
EXPLORANDO ALTERNATIVAS	137
RÉGUA E TRANSFERIDOR	144
REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ	147
EXPLORANDO (novas) ALTERNATIVAS	155
DISPERSÃO DA LUZ BRANCA	158
A FORMAÇÃO DO ARCO-ÍRIS	161
QUESTIONÁRIO FINAL	166
FUNDAMENTAÇÃO DO MATERIAL	168
PLANOS DE AULA	172
GABARITO	195
SLIDES	196

Em **azul**, os capítulos exclusivos que fazem parte do **manual do professor**.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rodo de piscina.

Figura 2: Dispersão da luz branca em um prisma de vidro.

Figura 3: Arco-íris primário e secundário.

Figura 4: Simulador “Desvio da Luz” do PhET Colorado

Figura 5: Interface do simulador “Desvio da Luz”.

Figura 6: Explorando fenômenos ópticos a partir do simulador “Desvio da luz”.

Figura 7: Arco-íris primário.

Figura 8: EVA “tatame” e estilete.

Figura 9: Base e *laser pointer*.

Figura 10: Procedimento para vedar o copo cilíndrico.

Figura 11: Copo com água devidamente vedado.

Figura 12: Copo disposto sobre o retângulo de EVA.

Figura 13: Montagem do aparato experimental.

Figura 14: Raios de luz emergindo do copo com água.

Figura 15: Uso de alfinetes para marcar os raios.

Figura 16: Marcação dos raios de luz na folha de papel

Figura 17: Círculo de papel para a marcação do centro da gota.

Figura 18: Marcação do centro da gota.

Figura 19: Marcação das retas normais.

Figura 20: Análise da primeira reflexão interna.

Figura 21: Reflexão em um espelho plano.

Figura 22: Reflexão especular dos raios de luz.

Figura 23: Reflexão difusa dos raios de luz.

Figura 24: Raio incidente, refletido, reta normal e ângulos de incidência e reflexão.

Figura 25: Reflexão da luz em uma superfície curva.

Figura 26: Representação esquemática do fenômeno da refração da luz.

Figura 27: Representação da refração da luz em dois casos. Em (a) a luz vai do meio menos refringente para o mais refringente. Já em (b) ocorre o inverso.

Figura 28: Capa do disco “The Dark Side of the Moon”, da banda Pink Floyd.

Figura 29: Usando o simulador “Desvio da Luz” para verificar a refração sofrida por um raio de luz vermelha.

Figura 30: Representação esquemática do comportamento de um raio de luz branca que incide sobre uma gota de chuva esférica.

Figura 31: Observador percebe os raios de luz provenientes das gotas de chuva.

Figura 32: Percepção do arco-íris para um observador posicionado no ponto antissolar.

Figura 33: Arco-íris secundário. (a) Comportamento dos raios de luz no interior da gota; (b) Percepção do observador do arco-íris secundário.

Figura 34: Fenômenos ópticos.

Figura 35: Feixe de luz atravessa do meio A para o B.

## COMO FUNCIONA ESTE MATERIAL?

“Conhecendo o arco-íris” é composto por 9 fascículos que serão distribuídos semanalmente. A Parte 01, por exemplo, está prevista para ser entregue na primeira aula, enquanto que a Parte 02 será disponibilizada aos estudantes no terceiro encontro. Esta dinâmica se repetirá até o desfecho deste material.

À medida que você for recebendo os fascículos, compile-os em uma pasta. Isso será importante para fazer consultas no futuro.

Cada capítulo conta com uma estrutura diferente. Enquanto alguns deles focam na exposição de conteúdos, outros estão voltados para a prática experimental, trazendo roteiros e questionamentos a serem respondidos a medida que os procedimentos são realizados.

Algumas atividades se repetem nos fascículos. Sobre elas, listamos as mais importantes:

### REFLITA & RESPONDA

Esta seção será voltada para que o estudante possa expor, a partir da escrita, suas conclusões a respeito de um experimento, de uma simulação ou de uma análise de imagens. São estas respostas que, no fim do processo, irão indicar a evolução do domínio do conteúdo por parte do leitor.

### EXERCÍCIOS

Neste tópico o estudante irá ter contato com exercícios de fixação. Estes servem para que o leitor reconheça a importância de alguns termos científicos utilizados no estudo da formação do arco-íris. O gabarito destes exercícios estará em posse do professor.

Como dito anteriormente, este material traz o uso de algumas simulações como estratégia de aprendizado. Para acessá-las, faremos uso de **QR Codes**.



Para ler o código ao lado, sugerimos que você baixe o aplicativo “Leitor QR”, disponível em lojas como a Play Store. Em seguida, escaneie-o apontando a câmera para a imagem toda vez que ela aparecer.

PARTE

01

# FENÔMENOS ÓPTICOS

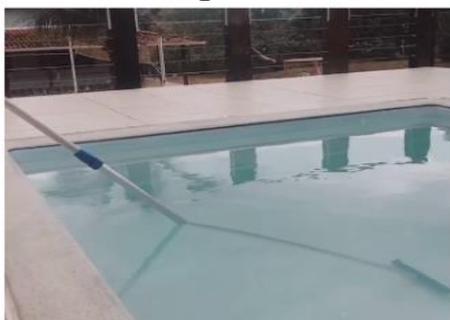
Nosso objetivo é estudar uma série de conceitos da óptica geométrica através do belo fenômeno da formação do arco-íris. Mas antes de chegarmos lá, precisamos tomar consciência do que você já sabe sobre esse importante ramo da física que trata do estudo da luz.

## ATIVIDADE I

Para isso, vamos avaliar algumas imagens! Observe-as no detalhe e responda às perguntas sobre cada uma delas.

### IMAGEM 01

Figura 1



Fonte: o autor.

O que você observa na imagem ao lado?

### IMAGEM 02

Figura 2



Fonte:

<<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/a-dispersao-luz-branca.htm>>

Descreva o que você observa na imagem ao lado.

### IMAGEM 03

Figura 3



Fonte:

<<https://gauchazh.clicrbs.com.br/opiniaio/noticia/2017/05/duplo-arco-iris-em-canoas-9797633.html>>

O que você observa na imagem ao lado? Descreva-a e responda: **como ocorre este fenômeno?**

#### REFLITA & RESPONDA

Qual é a relação que as imagens 01, 02 e 03 têm entre si? Identifique suas semelhanças.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### ATIVIDADE II

Na imagem 01, você pôde observar que quando passa de um meio para o outro (da água para o ar, neste caso), a luz sofre um desvio angular. É por conta disso que percebemos o objeto aparentemente “quebrado”.

Este acontecimento é consequência do fenômeno da **refração da luz**. Para começarmos a estudá-lo, vamos usar o simulador “Desvio da luz”, produzido pelo PhET Colorado e que pode ser acessado pelo QR Code a seguir.

Figura 4: Simulador “Desvio da Luz” do PhET Colorado

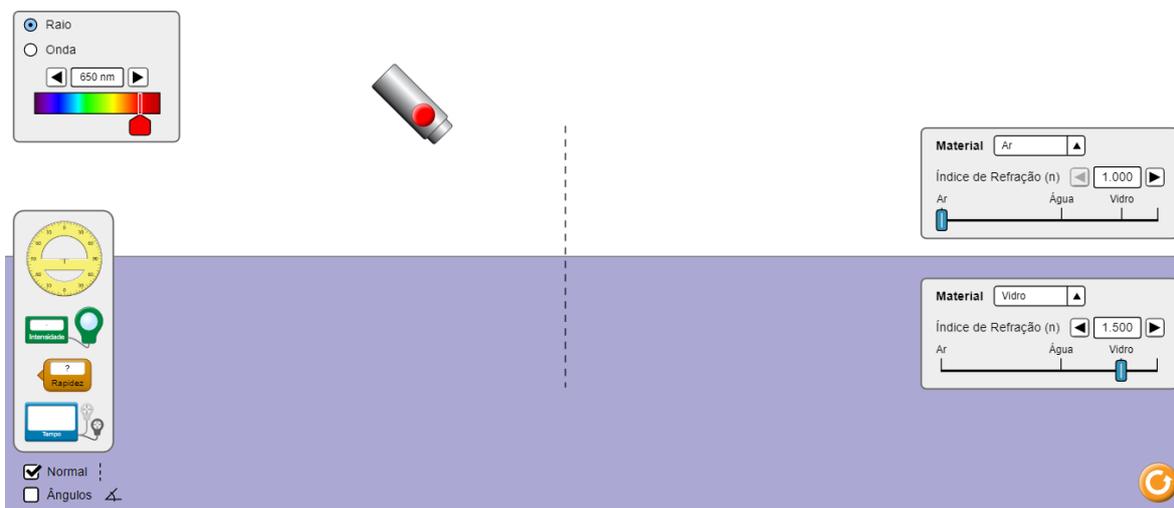


[https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_pt_BR.html)

Com o uso deste simulador, vamos construir alguns conceitos que serão aproveitados para o entendimento de como o arco-íris é formado. Para tanto, siga as seguintes recomendações.

1. Clique na opção “Mais Ferramentas”. A tela que irá aparecer será a seguinte:

Figura 5: Interface do simulador “Desvio da Luz”.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulations/bending-light](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/bending-light)>

2. Clique sobre o botão vermelho do *laser*.

Nas linhas abaixo, descreva o que você está vendo.

.....

.....

.....

.....

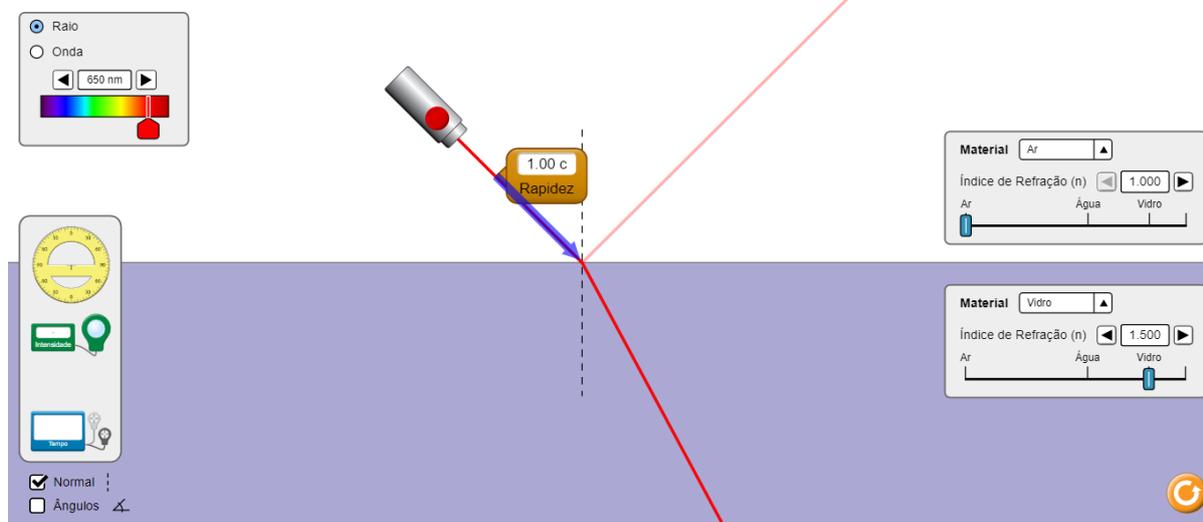
3. No canto inferior esquerdo, clique sobre a opção “Ângulos”.

4. Em seguida, varie a posição do *laser*, arrastando-o. No espaço abaixo, faça um desenho simplificado daquilo que você vê, anotando os ângulos exibidos.



5. À esquerda você pode verificar a possibilidade de algumas ferramentas, dentre elas um transferidor, um medidor de intensidade e outro de velocidade. Selecione o medidor de velocidade e arraste até os raios de luz, como indicado abaixo.

Figura 6: Explorando fenômenos ópticos a partir do simulador “Desvio da luz”.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulations/bending-light](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/bending-light)>

Meça a velocidade de propagação da luz de todos os três raios: o que chega pelo ar, o que sai pelo ar e o que atravessa o vidro. Anote os resultados e escreva sua conclusão.

.....

.....

.....

.....

6. Use o medidor de intensidade para coletar estes dados a respeito dos três raios anteriormente citados. O que ocorre com essa intensidade?

.....  
.....

<b>REFLITA</b>	<b>&amp;</b>	<b>RESPONDA</b>
----------------	--------------	-----------------

Com base no simulador e naquilo que você escreveu anteriormente, escreva um pequeno texto sobre o fenômeno simulado.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**PARTE****02**

# **A LUZ DO SOL E A GOTA DE CHUVA**

Como vimos no capítulo 01, o arco-íris é resultado de uma série de fenômenos físicos. A refração e a reflexão da luz são alguns exemplos do que ocorre para que seja possível ver o belíssimo espetáculo nos céus.

Muito se fala sobre o que é necessário para que o arco-íris apareça, porém normalmente o que nos informam é incompleto e, por conta disso, nos deixam cheios de dúvidas. É necessário que haja chuva? É necessário que haja luz solar? Há mesmo um baú de ouro no fim do arco-íris?

Algumas destas dúvidas e um pouco mais começarão a ser respondidas agora.

Antes disso, porém, vamos fazer a leitura crítica de um artigo cujo objetivo é tentar explicar como ocorre a formação do arco-íris. Com a análise deste texto, você começará a se familiarizar com alguns termos que são muito importantes no estudo da óptica geométrica.

Leia o texto duas vezes. Na segunda, grife as informações que julgar mais relevantes e transcreva-as em seu caderno.

## COMO OCORRE A FORMAÇÃO DO ARCO-ÍRIS?

Adaptado de <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/arco-iris>

Figura 7: Arco-íris primário.



Fonte: o autor.

A formação do arco-íris ocorre quando uma luz branca é interceptada por uma gotícula de água. Quando ocorre a interceptação uma parte da luz solar é refratada para dentro da gota, refletida em seu interior e refratada novamente para fora da gota, formando o espectro de cores.

Considerando que a luz branca é, na realidade, a mistura de várias cores, é possível compreender porque ela faz aparecer o espectro de cores ao atravessar uma superfície líquida. Este fenômeno chama-se dispersão da luz branca.

Além de ocorrer na natureza, o fenômeno do arco-íris pode ser reproduzido através da refração de luz por um prisma de vidro. A refração é o processo de desvio do feixe de luz ao passar de um meio material para outro. Os meios transparentes e translúcidos, meios materiais capazes de propagar luz, apresentam um índice de refração que varia de acordo com suas características.

Ao atravessar do meio material ar para o meio material água, a luz passa pelo processo de refração, uma vez que o índice de refração de ambos os meios possuem valores diferentes. Isso faz com que a velocidade da luz seja diferente nos dois. Dessa forma, as gotas de chuva funcionam como um prisma natural, pois elas também possuem seu índice de refração.

Disponível integralmente em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/arco-iris>. Acesso em 01/10/2021.

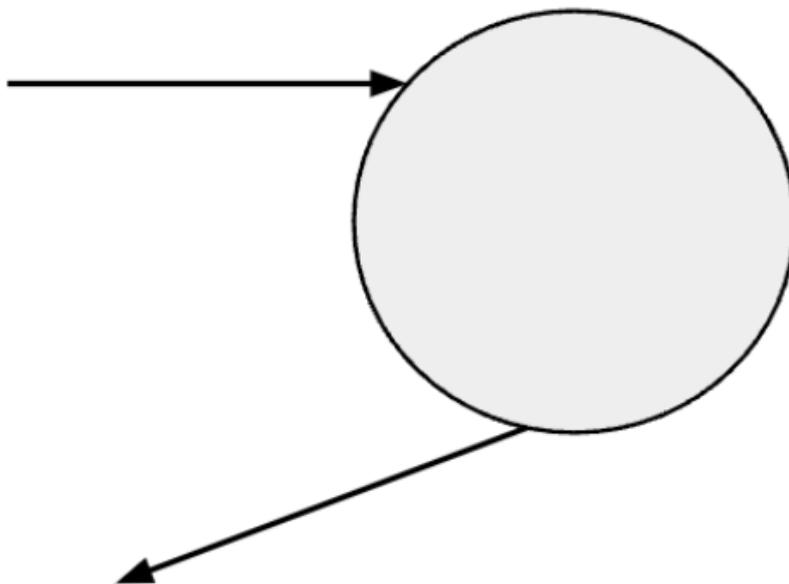
Com a leitura do texto acima, você já conhece alguns termos importantes que fazem parte da explicação do surgimento do arco-íris.

Já sabemos, por exemplo, que os fenômenos de reflexão e refração da luz estão presentes em nosso estudo. Mas não é apenas isso que já temos conhecimento.

Há a necessidade de haver gotas de chuva no céu que recebam a luz proveniente do Sol. Com base nessa informação, vamos passar para a próxima atividade.

### **ATIVIDADE III**

Abaixo você pode observar o desenho de uma gota de chuva. A luz solar chega nela por cima e sai por baixo. **Use sua imaginação** e desenhe a trajetória de um raio de luz quando ela passa pela gota.



Até agora, estamos apenas supondo (a partir de algumas informações que lemos no artigo) como a luz se comporta dentro da gota para que o arco-íris se forme.

A partir do próximo capítulo, focaremos nossos esforços em construir conceitos - principalmente a respeito da reflexão e da refração. Já tivemos contato com estes termos e nosso próximo objetivo será compreendê-los. Depois disso, iremos relacioná-los com o fenômeno do arco-íris.

## PARTE

## 03

**EXPLORANDO  
ALTERNATIVAS**

É hora de colocar a mão na massa!

Neste capítulo, vamos fazer um experimento que visa identificar os principais fenômenos relacionados com a formação do arco-íris e quais são suas propriedades.

O objetivo é que, após a prática, você perceba que os mesmos processos que ocorrem rotineiramente na vida cotidiana são aqueles que permitem explicar a formação deste belíssimo fenômeno.

Para este experimento, vamos precisar dos seguintes materiais:

- Folhas de papel sulfite tamanho A4;
- Estilete;
- Tesoura;
- Régua de 30 cm de comprimento;
- EVA “tatame” de dimensões 50x50x1 cm;
- Copo de vidro cilíndrico de diâmetro igual a 5,3 cm;
- Caneta *laser pointer* preferencialmente verde;
- Alfinetes de cabeça;
- Água;
- Fita adesiva “Durex”;
- Canetas e lápis.

Siga os passos descritos abaixo e, logo na sequência, responda aos questionamentos sobre a prática.

Figura 8: EVA “tatame” e estilete.



Fonte: o autor.

Use uma folha de papel A4 como molde para recortar um pedaço do EVA “tatame”. Com o correto - e cuidadoso - manuseio do estilete, o resultado será semelhante ao que está representado acima.

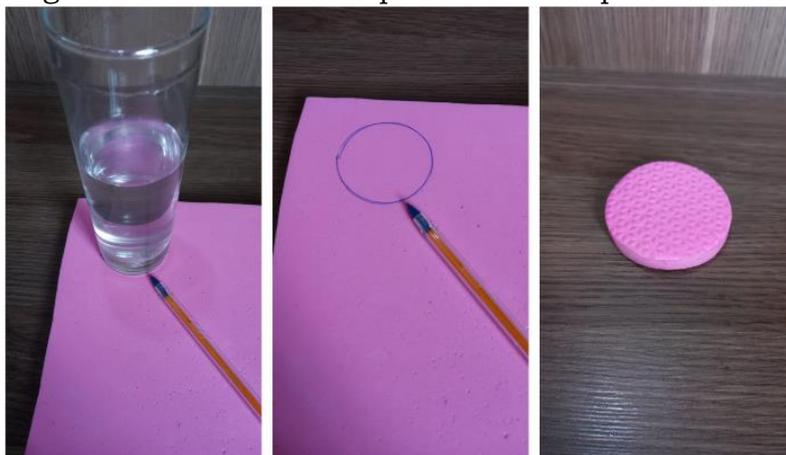
Figura 9: Base e *laser pointer*.



Fonte: o autor.

Com o uso de pedaços de EVA e alfinetes, construa o suporte ilustrado. Ele servirá como base do *laser pointer* durante a execução do experimento.

Figura 10: Procedimento para vedar o copo cilíndrico.



Fonte: o autor.

Use o diâmetro do copo para marcar a base em outro pedaço de EVA. Com a marcação feita, utilize cuidadosamente o estilete para confeccionar um círculo com o mesmo tamanho da boca do copo.

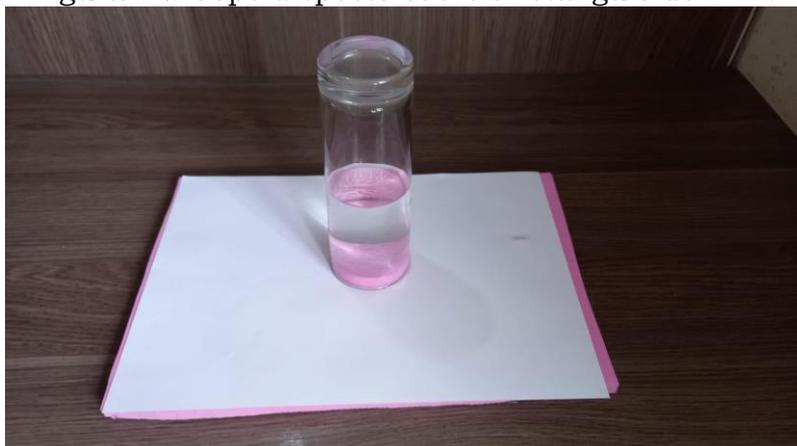
Figura 11: Copo com água devidamente vedado.



Fonte: o autor.

Encha  $\frac{2}{3}$  do copo com água e tampe-o com o círculo de EVA produzido na etapa anterior. Vire o recipiente sobre uma pia e verifique se o conteúdo não vaza. Caso haja vazamento, utilize uma fita veda rosca.

Figura 12: Copo disposto sobre o retângulo de EVA.



Fonte: o autor.

Posicione uma folha de papel sobre o retângulo de EVA. Acima dela, em seu centro, coloque o copo com água virado para baixo. Após isso, circule com uma caneta a circunferência do copo.

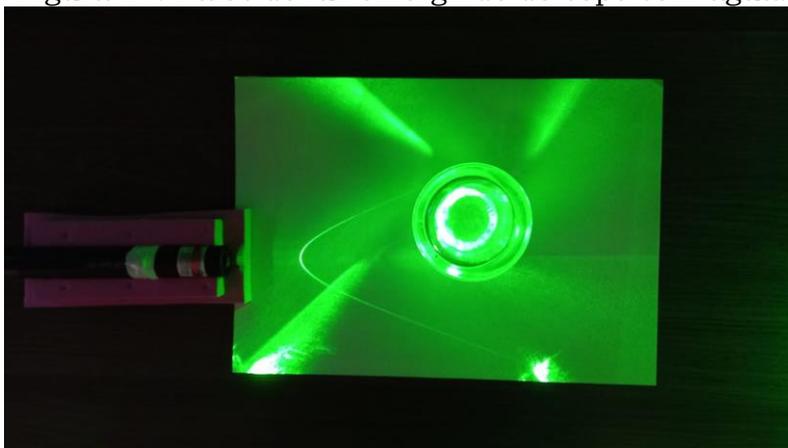
Figura 13: Montagem do aparato experimental.



Fonte: o autor.

Coloque o *laser pointer* sobre a base. Use a fita adesiva para manter o botão de ativação do *laser* ligado. Cuidese para não mirar o feixe nos seus olhos e/ou de seus colegas.

Figura 14: Raios de luz emergindo do copo com água.



Fonte: o autor.

Ajuste a posição do *laser* e da base de modo que o feixe passe pelo centro do copo. Depois, desloque-o longitudinalmente até que os raios de luz que emergem do recipiente estejam dispostos como na imagem acima.

Figura 15: Uso de alfinetes para marcar os raios.

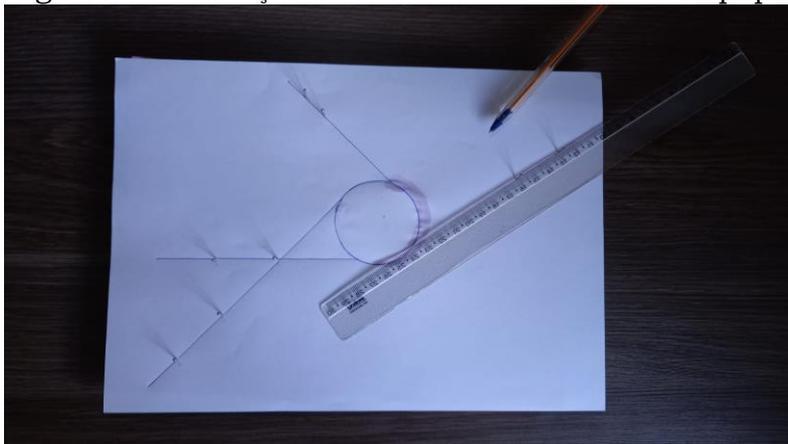


Fonte: o autor.

Utilize os alfinetes-cabeça para marcar os raios de luz: Tanto o que chega ao copo, quanto aqueles que saem dele. Para cada um destes raios, utilize dois alfinetes.

**Dica:** marque o raio que chega ao copo por último. Use como referência o “sumiço” dos outros feixes para marcar estes pontos.

Figura 16: Marcação dos raios de luz na folha de papel



Fonte: o autor.

Retire o copo de cima da folha de papel.

Com a régua, trace retas cujo suporte são os alfinetes espetados. O resultado é semelhante ao que está exposto na imagem.

Observe a folha de papel, com todas as marcações feitas durante a experimentação. Note que existe um raio de luz que chega até o círculo e outros que saem dele. Oriente, através de uma seta para cada reta, o sentido de propagação destes feixes.

Contudo, se há raios que entram no círculo e outros que saem, é de se perceber que também devem existir raios de luz que se propagam dentro da água. Para ilustrá-los, o processo é simples:

**Insira alfinetes em todos os pontos em que os raios intersectam o perímetro da circunferência.** Na sequência, posicione a régua de modo que ela fique apoiada em dois alfinetes consecutivos e use a caneta para **desenhar uma reta que ligue estas referências.**

Faça isso até que haja uma continuidade do caminho do raio de luz que chega até o círculo e aquele que sai dele.

A ideia é que após executar este experimento, você já saiba que quando a luz do *laser* incide sobre um copo com água, ela se propaga dentro do recipiente sofrendo desvios até que saia dele.

Iremos estudar estes desvios na Parte 04 deste material. Por enquanto, reflita e responda sobre o que fizemos até aqui.

<b>REFLITA</b>	<b>&amp;</b>	<b>RESPONDA</b>
----------------	--------------	-----------------

O que ocorre com a luz solar quando ela incide sobre uma gota de chuva?

.....

.....

.....

.....

## PARTE

## 04

**RÉGUA E  
TRANSFERIDOR**

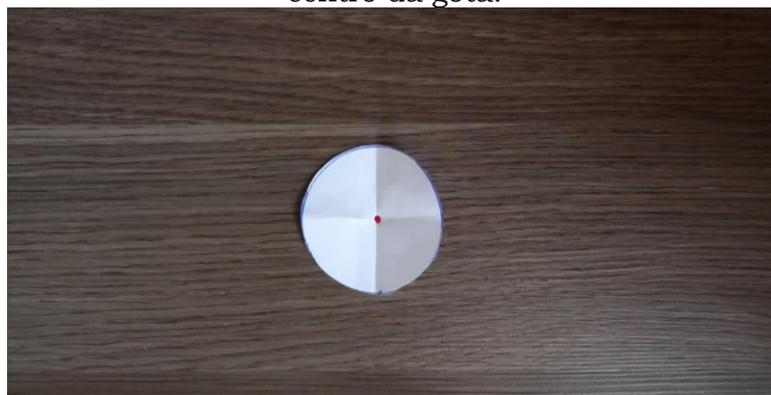
Neste momento, vamos aproveitar aquilo que produzimos experimentalmente no encontro passado e ir além. É necessário que você tenha à disposição a folha em que foram feitas as marcações do círculo do copo e os raios de luz que entram e saem dele.

Além disso, tenha em mãos as ferramentas da seguinte lista:

- Transferidor;
- Régua;
- Tesoura;
- Folhas de papel sulfite.

A primeira etapa de nossa análise irá consistir em reconhecer as leis por trás dos fenômenos da reflexão e refração da luz. Para tanto, siga as etapas que seguem.

Figura 17: Círculo de papel para a marcação do centro da gota.

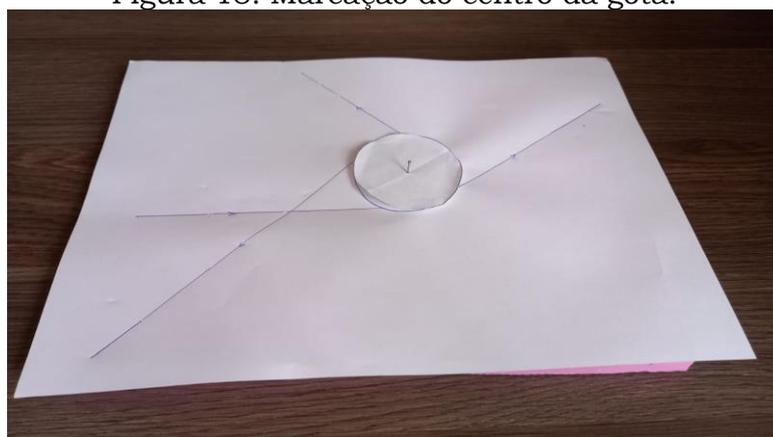


Fonte: o autor.

Em uma folha de papel, contorne novamente o copo utilizado na prática anterior. Em seguida, use uma tesoura para cortar um círculo. Dobre-o duas vezes e marque o centro com uma caneta. O resultado será como o que está representado acima.

Este círculo de papel nos servirá para marcar uma reta de referência que será conhecida como **reta normal**.

Figura 18: Marcação do centro da gota.



Fonte: o autor.

Posicione o círculo de papel sobre o outro desenhado na folha da atividade anterior. Com um alfinete, espete o centro. Depois, desmonte o que acabou de fazer.

Neste momento, iremos apelar para um conhecimento antigo de geometria. Esta área da matemática nos diz que toda reta que passa tanto pelo centro de um círculo quanto por sua borda, é perpendicular à circunferência. Esta é justamente a propriedade da reta normal.

Figura 19: Marcação das retas normais.



Fonte: o autor.

Trace uma reta pontilhada que passe pelo centro marcado do círculo e o primeiro ponto de refração. Esta é a reta normal.

Com este parâmetro desenhado, vamos passar à medição de alguns ângulos importantes. O ângulo formado entre o raio incidente e a normal é o ângulo de incidência. Use o transferidor e anote este valor.

Utilize o mesmo material para medir o ângulo formado entre a normal e o primeiro raio refratado para dentro da gota. Este é nosso ângulo de refração. Anote o valor encontrado.

**O ângulo de incidência é igual ao ângulo de refração? O que ocorre com o raio de luz quando ele penetra a água?**

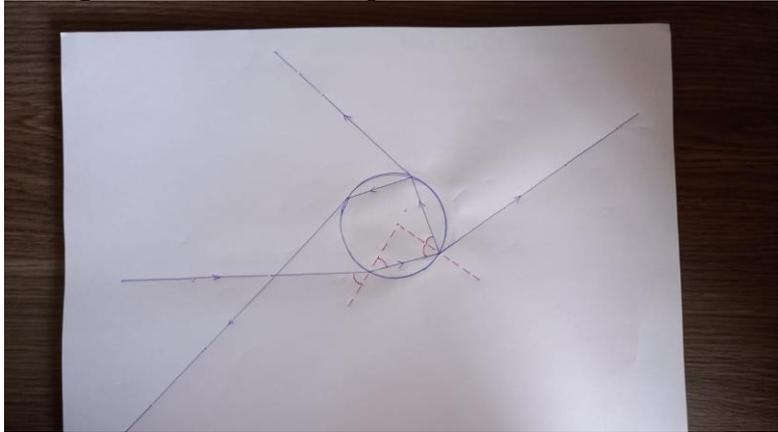
.....

.....

.....

Vamos voltar o foco para a primeira reflexão interna da luz. Identifique-a e marque a reta normal no ponto de incidência.

Figura 20: Análise da primeira reflexão interna.



Fonte: o autor.

Use o transferidor para obter o ângulo de incidência (formado entre o raio que incide naquele ponto e a normal) e o ângulo de reflexão (entre o raio refletido e a mesma normal).

**A partir da última medição realizada, qual conclusão podemos tirar a respeito dos ângulos de incidência e reflexão?**

.....

.....

.....

.....

## PARTE

## 05

## REFLEXÃO E REFRAÇÃO

## DA LUZ

Há uma série de fenômenos físicos relacionados com a formação do arco-íris. Neste primeiro momento, vamos ressaltar dois deles: a reflexão e a refração da luz. Além deles, há a dispersão da luz branca, que será estudada mais adiante quando abandonarmos o *laser* de luz verde para dar espaço a uma lanterna de luz branca.

Vamos começar pelo fenômeno mais simples: a reflexão.

### Reflexão da luz

A reflexão da luz é um dos fenômenos ópticos mais conhecidos do nosso dia-a-dia. Isso porque sabemos que quando estamos de frente a um espelho, é justamente a reflexão que nos permite ver a nós mesmos. Mas não é necessário que haja um espelho para haver reflexão. Uma lâmina de água, por exemplo, já é o suficiente para que possamos nos observar.

Figura 21: Reflexão em um espelho plano.

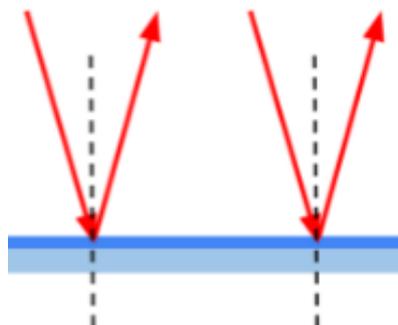


Fonte: o autor.

Quando a luz se propaga no ar e encontra o que chamamos de superfície refletora, ela “ricocheteia”, continuando no mesmo meio mas sofrendo um desvio angular com relação a sua propagação original.

Existem duas formas de reflexão: a primeira delas é a **especular**, também conhecida como regular. É esta que acontece no espelho e ela é caracterizada pelo fato de que os raios refletidos (que “saem” da superfície refletora) são todos paralelos.

Figura 22: Reflexão especular dos raios de luz.

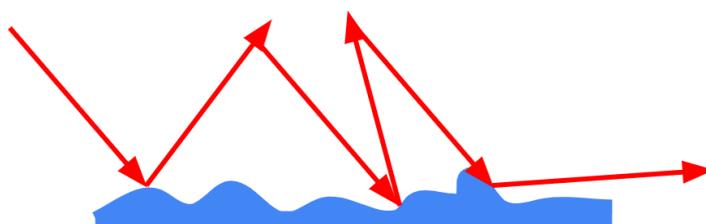


Fonte: o autor.

Contudo há também a reflexão **difusa**. E por mais que seja contraintuitivo, este tipo de reflexão é muito importante para que vejamos tudo o que está ao nosso redor.

Na difusa, os raios refletidos não são paralelos e o resultado disso é que não enxergamos o nosso reflexo nestas superfícies. Você só pode estar lendo este livro pois a luz chega até ele e reflete difusamente.

Figura 23: Reflexão difusa dos raios de luz.



Fonte: o autor.

A polidez da superfície é o fator que define se a reflexão será especular ou difusa.

Para o estudo da reflexão, temos de estar cientes de alguns nomes importantes e que serão repetidos inúmeras vezes daqui em diante. A ilustração abaixo representa um raio de luz que incide sobre uma superfície refletora. Este raio será chamado de **incidente**. Já aquele que emerge dela será denominado de **raio refletido**.

Mas além destes raios, existe outra reta à qual dedicaremos especial atenção: trata-se da **reta normal**. Já falamos sobre ela nos experimentos realizados anteriormente.

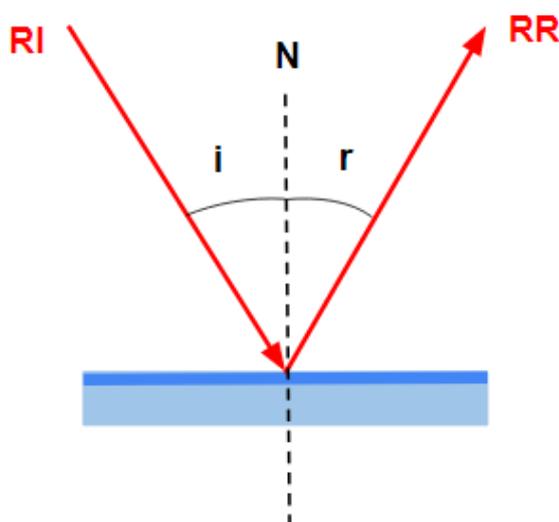
A “normal” é uma reta que sempre forma  $90^\circ$  com a superfície refletora e servirá de referência para a medição de ângulos muito importantes para o estudo da

reflexão. É importante frisar que a normal não tem realidade física e é apenas um instrumento que nos será muito útil no futuro.

O **ângulo de incidência** é formado entre o raio incidente e a reta normal. Já o **ângulo de reflexão** vai da reta normal até o raio refletido.

No desenho abaixo é possível reconhecer cada um destes componentes.

Figura 24: Raio incidente, refletido, reta normal e ângulos de incidência e reflexão.



Fonte: o autor.

Com estes nomes em mente, vamos passar às duas **Leis da Reflexão**.

**O raio incidente, o raio refletido e a reta normal são coplanares;**

*e*

**O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.**

As duas leis da reflexão já foram experimentadas por nós na prática prevista para as Partes 03 e 04 deste material didático. Dizer que estes raios são coplanares é afirmar que tanto o raio incidente quanto o refletido e a reta normal pertencem ao mesmo plano bidimensional.

E isso é verdade!

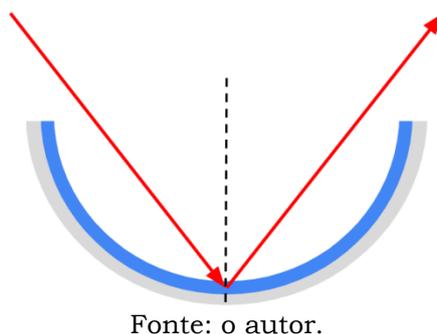
A partir do momento em que definimos o plano que contém RI e N, necessariamente o RR deverá estar nele.

Com relação à outra lei da reflexão não restam muitas dúvidas a respeito de seu significado. Se elas ainda persistirem, podemos resolvê-lo de uma maneira muito simples: basta desenhar a normal à superfície do corpo em um dos pontos de incidência da luz e medir tais ângulos com um transferidor.

Já fizemos isso no fascículo anterior.

Convém fazer uma observação importante: a reflexão não ocorre apenas em superfícies planas. Vimos no próprio experimento que é perfeitamente possível que uma reflexão ocorra em superfícies encurvadas, como a do copo com água.

Figura 25: Reflexão da luz em uma superfície curva.



## Refração da luz

Já sabemos que quando um raio de luz incide sobre uma superfície dita refletora, irá ocorrer o fenômeno da reflexão.

Contudo, este não é o único fenômeno óptico existente. Olhe pelo vidro da janela mais próxima: além do seu próprio reflexo - menos intenso - você também percebe o que está do outro lado. Isso pois a luz proveniente dos objetos que estão no exterior atravessa o vidro e chega até você.

Quando a luz incide obliquamente na superfície de separação entre dois meios, ela sofre um desvio angular ao passar para o outro lado e, por consequência, altera o valor de sua velocidade de propagação. Neste caso, dizemos que ocorre o fenômeno da **refração**. Podemos citar outros inúmeros exemplos!

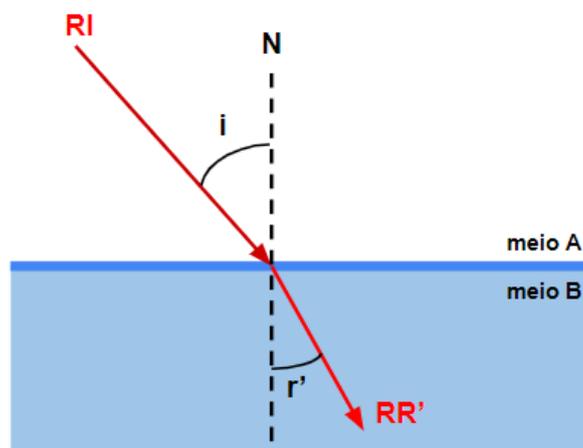
Em um dia ensolarado, você percebe que há alguém submerso dentro de uma piscina. Se é possível observá-la, é porque a luz que parte dela atravessa da água para o ar e chega até seus olhos. Ao transitar da água para o ar, a luz mudou de meio e alterou o valor velocidade de sua velocidade de propagação.

Na Atividade I da Parte 01 deste material didático, tivemos contato com a imagem de um rodo de piscina parcialmente submerso. Foi possível observar o que muitos chamam de “ilusão de óptica”: para quem observa apressado, pode parecer que o instrumento está quebrado.

Contudo, não há nada danificado. O que ocorre é que, em decorrência da refração, a luz sofre um desvio angular e por isso surge a impressão de que a parte imersa do rodo está deslocada para cima.

A figura 26 ilustrada abaixo mostra a forma como a luz se comporta ao passar de um meio A para um meio B, sofrendo o desvio angular mencionado anteriormente. Neste caso, está ocorrendo a refração da luz.

Figura 26: Representação esquemática do fenômeno da refração da luz.



Fonte: o autor.

Observe que a imagem acima contém raios, retas e ângulos importantes para o estudo da refração. Assim como fizemos anteriormente, vamos nomear os principais componentes que iremos estudar.

O raio que chega até a interface de separação entre os dois meios é chamado de **incidente** (RI). Já aquele que “atravessa” para o outro lado será chamado de **raio refratado** (RR'). A **reta normal N** é perpendicular à superfície, enquanto que os **ângulos de incidência i e refração r'** são medidos desde a normal até os raios incidente e refratado, respectivamente.

Em cada meio a luz se propaga com uma velocidade diferente. No vácuo e no ar, por exemplo, ela atinge as maiores velocidades possíveis. Contudo, quando nos referimos à água, ao vidro e ao plástico, essa velocidade é menor.

A tabela abaixo exprime a velocidade de propagação da luz em alguns dos meios mais estudados em física.

Quadro 4.1: Velocidade de propagação da luz em meios materiais conhecidos.

Meio	Velocidade da luz (m/s)
Ar	299.702.547
Água	225.407.863
Álcool etílico	220.435.631
Vidro	199.861.638
Diamante	123.881.180

Fonte: o autor.

Em virtude destas discrepâncias, definimos uma grandeza física denominada **índice de refração** do meio. Este valor será específico para cada meio e não é difícil calculá-lo.

Para isso, usamos a seguinte equação:

$$n = \frac{c}{v}$$

Onde:

n: Índice de refração do meio;

c: Velocidade da luz no vácuo (em m/s);

v: Velocidade da luz no meio considerado (em m/s).

Note que estamos dividindo m/s por m/s. Por conta disso, o índice de refração é uma grandeza adimensional e não apresenta unidade de medida.

Vamos calcular o índice de refração do vácuo?

Como a velocidade de propagação da luz no vácuo é a própria velocidade da luz no vácuo, notamos que  $v = c$ . Desta forma, o índice de refração  $n$  será dado pelo quociente  $c/c$ . Ou seja, **o índice de refração do vácuo é igual a 1**.

Este valor é importante e aparece com muita recorrência nos exercícios.

O índice  $n$  do ar é de aproximadamente 1,0003. Por conta disso, é comum nos referirmos a esse valor apenas como sendo 1 também.

Tal como a reflexão, a refração também segue leis que regem este fenômeno. Vamos conhecê-las e, na sequência, discuti-las.

**O raio incidente, o raio refratado e a reta normal são coplanares;**

*e*

**Lei de Snell-Descartes<sup>1</sup>:**

$$n_A \text{sen}(i) = n_B \text{sen}(r')$$

Como a primeira das leis sugere, os raios incidente, refratado e a reta normal pertencem ao mesmo plano. É uma situação semelhante à da reflexão da luz: se o raio incidente e a normal definem um plano, necessariamente o refratado estará no mesmo.

Do ponto de vista prático, isso é um facilitador pois permitiu que trabalhássemos apenas em duas dimensões ao invés de três.

<sup>1</sup> Willebrord Snellius (1580-1626) e René Descartes (1596-1650) propuseram a esta lei da refração em 1621.

A outra lei, por sua vez, é um pouco mais complexa e exige nossa atenção por um pouco mais de tempo. Trata-se da Lei de Snell-Descartes e ela procura relacionar os índices de refração dos dois meios e os ângulos de incidência e refração. Dito de outra forma, esta lei permite com que saibamos qual será o desvio do raio de luz desde que conheçamos os meios nos quais ele transita e a forma como ele chega à interface de separação.

$n_A$  e  $n_B$  são os índices de refração. Podem ser do ar e da água, por exemplo.

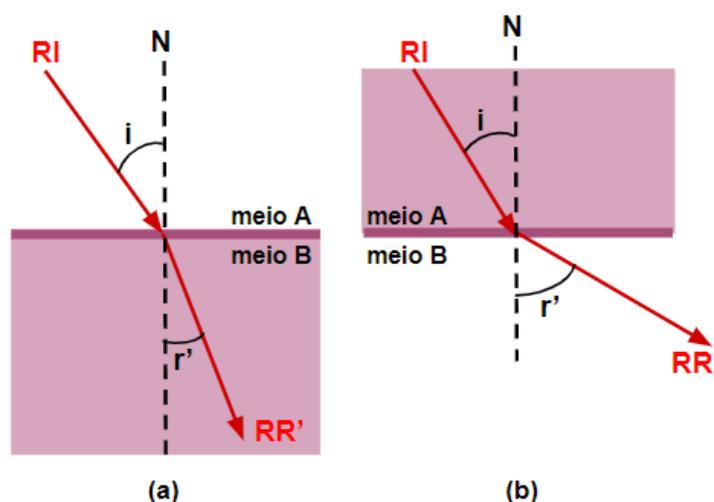
Já  $i$  e  $r'$  são os ângulos de incidência e refração. Para o cálculo decorrente da lei de Snell-Descartes, necessitamos dos valores dos senos desses ângulos. Estes podem ser obtidos em uma calculadora científica ou então nas antigas tabelas das funções trigonométricas.

Da mesma forma como ocorre na reflexão, a refração também ocorre em superfícies curvas. E você já sabe disso! Basta lembrar de nosso experimento em que o raio de luz proveniente do *laser* passava do ar para a água e sofria o desvio angular previsto pela lei de Snell-Descartes.

Se a luz passar de um meio de menor índice de refração (chamado de menos refringente) para outro de maior índice de refração (mais refringente), dizemos que o raio refratado se aproxima da normal.

Já se o raio vem de um meio mais refringente para outro menos refringente, observamos que o refratado se afasta da normal. Estas observações estão representadas na figura 27 abaixo e podem ser confirmadas no simulador “Desvio da Luz”, utilizado anteriormente.

Figura 27: Representação da refração da luz em dois casos. Em (a) a luz vai do meio menos refringente para o mais refringente. Já em (b) ocorre o inverso.



Fonte: o autor.

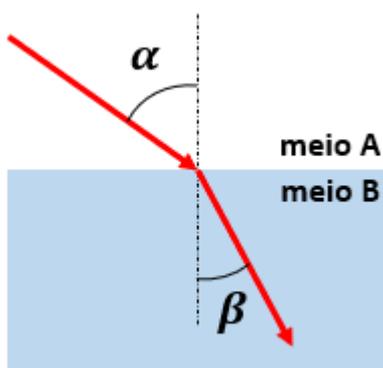
## EXERCÍCIOS

1) O ângulo formado entre o raio incidente e uma superfície refletora é de  $22^\circ$ . Assinale a alternativa que corresponde ao ângulo de reflexão (formado com relação à reta normal).

- a)  $68^\circ$ ;
- b)  $45^\circ$ ;
- c)  $22^\circ$ ;
- d)  $15^\circ$ .

2) A velocidade de um raio de luz em um meio especial é de  $1,2 \cdot 10^8$  m/s. Sabendo-se que a velocidade da luz no vácuo vale  $3 \cdot 10^8$  m/s, quanto vale o índice de refração deste meio?

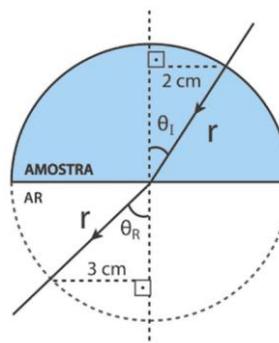
3) A figura abaixo representa a refração sofrida por um raio de luz quando ele passa de um meio A ( $n_A = 1$ ) para um meio B.



Considerando que  $\text{sen } \alpha = 0,6$  e  $\text{sen } \beta = 0,4$ , determine o índice de refração do meio B.

4) (Fatec-SP - Adaptado) Durante um ensaio com uma amostra de um

material transparente e homogêneo, um aluno do Curso de Materiais da Fatec precisa determinar de que material a amostra é constituída. Para isso, ele utiliza o princípio da refração, fazendo incidir sobre uma amostra semicircular, de raio  $r$ , um feixe de laser monocromático, conforme a figura.



MATERIAL	n
ar	1,00
resina	1,50
policarbonato	1,59
cristal dopado	1,60
cristal de titânio	1,71
cristal de lantânio	1,80

Utilizando os dados da figura e as informações apresentadas na tabela de referência, podemos concluir corretamente que o material da amostra é

- a) cristal de lantânio.
- b) cristal de titânio.
- c) cristal dopado.
- d) resina.

<b>PARTE</b>	<b>EXPLORANDO (novas)</b>
<b>06</b>	<b>ALTERNATIVAS</b>

Neste capítulo vamos refazer o experimento que dedicamos atenção na Parte 03 deste produto didático. Repetiremos alguns dos mesmos processos, mas com algumas diferenças importantes: a mais flagrante é o uso de uma lanterna de luz branca, em substituição ao *laser* de luz verde.

Em virtude disso, sugerimos que parte da prática seja executada em um ambiente escuro. Este cuidado deve facilitar a identificação dos feixes de luz que nos serão úteis para a realização do experimento.

Tenha em mãos os seguintes materiais:

- Folhas de papel sulfite tamanho A4;
- Estilete;
- Tesoura;
- Régua de 30 cm de comprimento;
- EVA “tatame” de dimensões 50x50x1 cm;
- Copo de vidro cilíndrico de diâmetro igual a 5,3 cm;
- Lanterna de luz **branca**;
- Alfinetes de cabeça;
- Água;
- Fita adesiva “Durex”;
- Canetas e lápis.

É possível perceber, logo a partir da análise dos materiais requisitados, que alguns dos processos serão idênticos aos realizados no experimento descrito na Parte 03.

Por exemplo: o copo com água vedado com um círculo de EVA terá a mesma função da prática anterior. O pedaço retangular de EVA recortado a partir das dimensões de uma folha sulfite, *idem*. Desta forma, é prudente utilizar as mesmas preparações.

Siga cada uma das etapas descritas abaixo. Tente recordar daquilo que já foi executado e fazer cada procedimento com sua equipe. Em caso de dúvidas persistentes, chame seu professor.

1. Disponha uma folha de papel sulfite sobre a base retangular de EVA;

2. Posicione sobre ela o copo com água vedado voltado para baixo. Utilize uma caneta para marcar a circunferência do copo na folha de papel;  
Um detalhe que pode fazer a diferença em seu experimento é a colagem de uma tira de papel preto em torno do copo, limitando uma pequena região para a passagem da luz da lanterna.
3. Coloque a lanterna de luz branca em uma das extremidades do pedaço retangular de EVA e ligue-a. Você deverá observar o aparecimento de raios de luz coloridos emergindo do copo;  
Caso não seja possível realizar esta observação, mova o copo sutilmente sem tirá-lo de sua marcação na folha de papel.
4. Insira dois alfinetes para marcar a direção de cada um dos raios de luz coloridos;
5. Faça uso de um obstáculo - pode ser outro retângulo de EVA - para interromper os raios de luz provenientes da lanterna e que incidem sobre o copo. Movimente tal obstáculo até que o feixe luminoso colorido desapareça;
6. Na sombra deste obstáculo sobre a folha, insira dois alfinetes para marcar esta direção;
7. Na outra extremidade da folha é possível perceber que há uma sombra dos alfinetes que indicam o feixe de luz incidente. Marque esta sombra com o alinhamento de outros dois alfinetes;
8. Com todas estas marcações feitas, já é possível retirar o copo de cima da folha de papel.

Antes de continuarmos, responda a duas pequenas perguntas:

Quem o copo com água está representando neste experimento?	Quem a luz da lanterna está representando neste experimento?

Com todas as preparações executadas, vamos passar para a tarefa de completar o desenho. Já fizemos um processo semelhante na Parte 03 deste material;

9. Marque o centro do círculo. Procedimento parecido já foi utilizado no passado, quando foi usado outro círculo de papel - de mesmo diâmetro do copo - e um alfinete;
10. Com uma régua apoiada sobre os alfinetes que representam o feixe incidente, marque esta direção utilizando uma caneta. Indique o sentido da incidência com uma seta;

11. Marque também a direção dos raios de luz que saem do copo. Indique o sentido com uma seta;
12. Espete alfinetes nos pontos em que ocorre a intersecção das retas com o círculo;
13. Em seguida, use a régua para traçar a direção de propagação da luz dentro da água;
14. Do centro do círculo até o primeiro ponto de intersecção do raio incidente com a circunferência, trace a reta normal (pontilhada);
15. Utilize o transferidor para medir os ângulos de incidência e refração. Anote estes valores no espaço abaixo:

Ângulo de incidência (i)	Ângulo de refração (r')

16. Use o transferidor para medir o ângulo de desvio sofrido pelo raio de luz ao passar pelo círculo. Registre este dado no campo abaixo:

$\Delta$

No procedimento 15 você obteve os ângulos de incidência e refração. Uma vez que já conhecemos o índice de refração do ar, basta que utilizemos a lei de Snell-Descartes para calcular o índice de refração da água. Use o espaço abaixo para fazer este cálculo.

--

PARTE

07

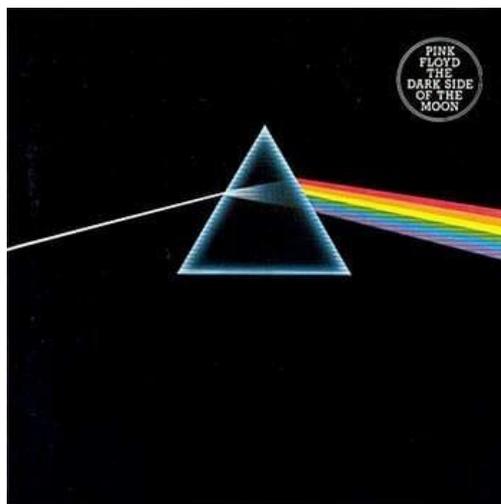
# DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

Na Parte 06 tivemos contato com um fenômeno no mínimo interessante: o feixe de luz branca que chegou até o copo saiu dele na forma de feixes de luz colorida. Esse fenômeno chama-se **dispersão da luz branca** e, neste capítulo, nos dedicaremos a estudá-lo.

A dispersão não é algo estranho. É até muito comum!

Em dias ensolarados é possível observar a formação desta faixa colorida quando a luz do Sol (que é branca) passa por uma janela, por exemplo. Além disso, os fãs do rock conhecem este fenômeno da capa do disco *The Dark Side of the Moon*, da banda britânica Pink Floyd, lançado em 1973.

Figura 28: Capa do disco “The Dark Side of the Moon”, da banda Pink Floyd.



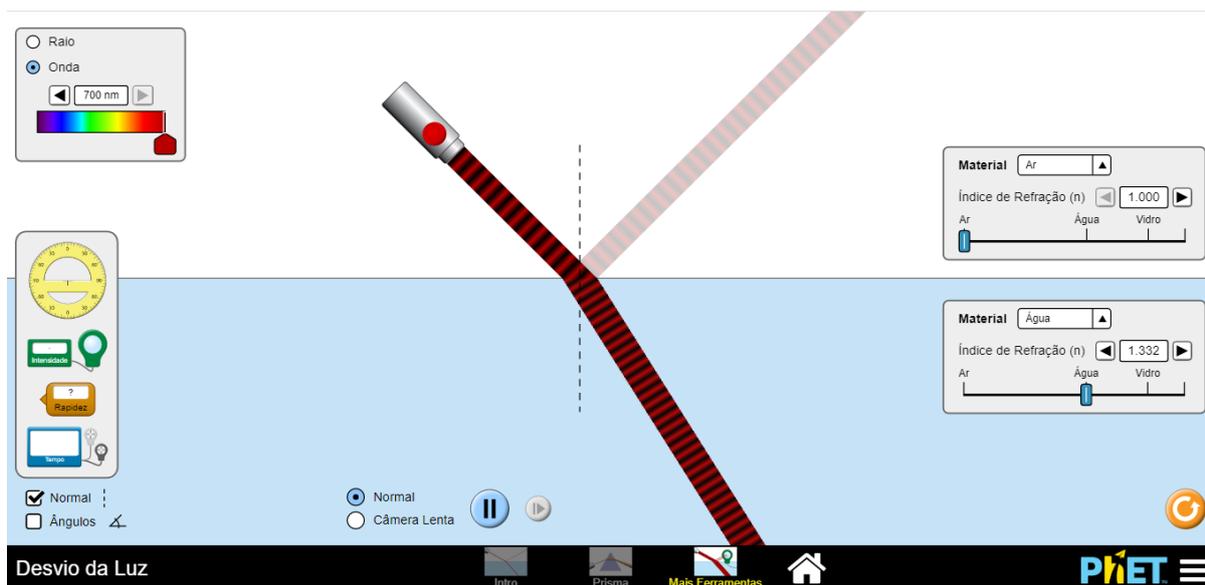
Fonte: <<https://www.culturagenial.com/the-dark-side-of-the-moon-pink-floyd>>

Para compreender um pouco mais sobre isso, vamos utilizar novamente o simulador “Desvio da Luz”.

Entre no *software* e selecione a opção “Mais Ferramentas”. No canto superior esquerdo, marque a opção “onda” e, em seguida, desloque o marcador para 700 nm.

Utilize como materiais de análise o ar e a água.

Figura 29: Usando o simulador “Desvio da Luz” para verificar a refração sofrida por um raio de luz vermelha.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulations/bending-light](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/bending-light)>

No canto inferior esquerdo, selecione a opção “Ângulos”. Registre, no espaço abaixo, o valor dos ângulos de incidência e refração;

Comprimento de onda	Ângulo de incidência (i)	Ângulo de refração (r')
700 nm (vermelho)		

Depois de anotar estas informações, altere o seletor para o comprimento de onda de 380 nm (violeta). Registre estes dados nos campos abaixo:

Comprimento de onda	Ângulo de incidência (i)	Ângulo de refração (r')
380 nm (violeta)		

Use a Lei de Snell-Descartes para determinar o índice de refração da água tanto para a luz vermelha quanto para a cor violeta.

Índice de refração para a água (luz vermelha)	Índice de refração para a água (luz violeta)
---	--

Utilize os valores obtidos no exercício anterior para responder à seguinte pergunta.

<b>REFLITA</b>	<b>&amp;</b>	<b>RESPONDA</b>
----------------	--------------	-----------------

Sabemos que o branco é a composição de todas as cores. Quando a luz solar (que é branca) incide sobre uma gota de chuva, todas as suas componentes irão refratar da mesma forma? Qual é a consequência disso? Justifique sua resposta.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## PARTE

## 08

## A FORMAÇÃO DO ARCO-ÍRIS

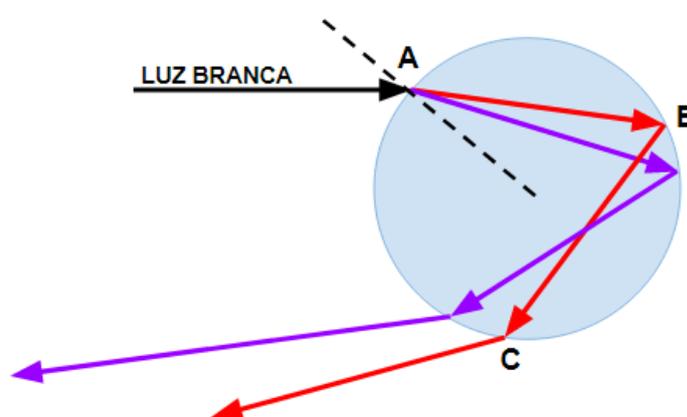
Estamos quase terminando nosso estudo. Neste momento, temos como objetivo juntar todo o conhecimento que já construímos - a respeito de luz, reflexão, refração e dispersão - com o plano de fundo que nos acompanha desde o início: a formação do arco-íris.

Para tanto, vamos retornar um pouco no passado. No desfecho da Parte 07, vimos que o índice de refração de um material muda a depender da luz que incide sobre ele. A consequência disso é que cores de luz diferentes desviam com ângulos de refração diferentes.

Desta forma, você pôde concluir que quando a luz branca incide sobre a água, cada uma de suas componentes se desvia com um ângulo distinto. O resultado disso é o que chamamos de dispersão: a luz branca “se divide” nas cores do arco-íris.

É justamente isso o que ocorre quando a luz do Sol encontra as gotas que caem do céu em um dia de chuva. A ilustração abaixo é simplificada: ela se restringe apenas aos dois extremos do espectro da luz visível, o vermelho e o violeta. As outras cores intermediárias foram ocultadas para não poluir demais o desenho.

Figura 30: Representação esquemática do comportamento de um raio de luz branca que incide sobre uma gota de chuva esférica.

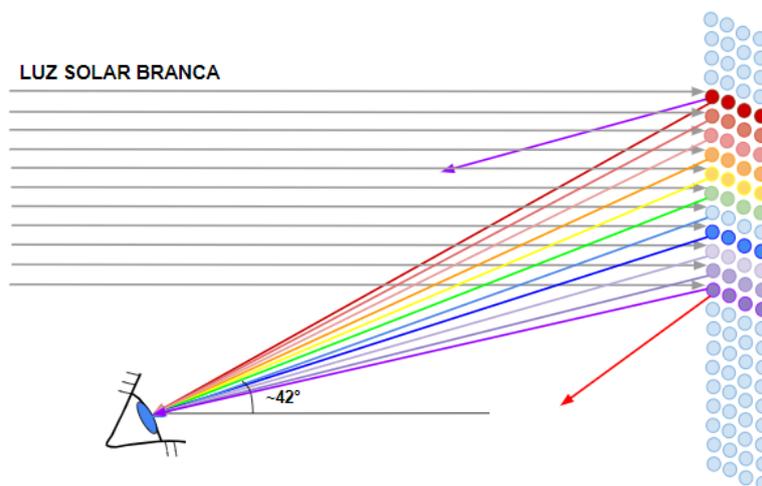


Fonte: o autor.

Observe que o raio de luz vermelha desvia mais do que o violeta na primeira refração. Você já havia chegado a esta conclusão no fim da Parte 07 deste material didático.

É evidente que um arco-íris não se forma a partir de apenas uma gota. O que vemos do céu é resultado combinado do mesmo processo em diversas gotículas de água. Observe a ilustração abaixo.

Figura 31: Observador percebe os raios de luz provenientes das gotas de chuva.

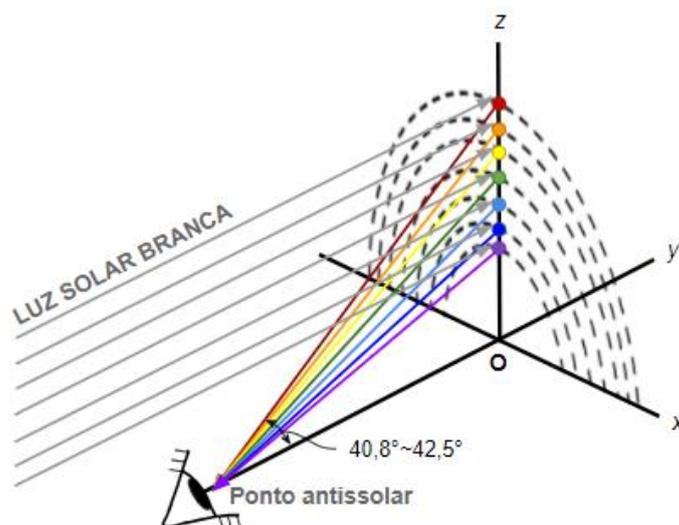


Fonte: o autor.

O observador é representado pelo olho posicionado na horizontal. Note que as gotas de cima são percebidas em vermelho pois é nesta cor que os raios que emergem dela chegam ao olho do indivíduo. Em compensação, as gotas de baixo são notadas na cor violeta pelo mesmo motivo. As gotas intermediárias são percebidas nas outras cores do espectro.

A ilustração demonstra que para o arco-íris ser notado pelo observador, é necessário que ele esteja posicionado de tal maneira que o ângulo de desvio com relação à horizontal (mesma direção dos raios de luz incidentes) esteja no intervalo entre  $40,8^\circ$  e  $42,5^\circ$ .

Figura 32: Percepção do arco-íris para um observador posicionado no ponto antissolar.



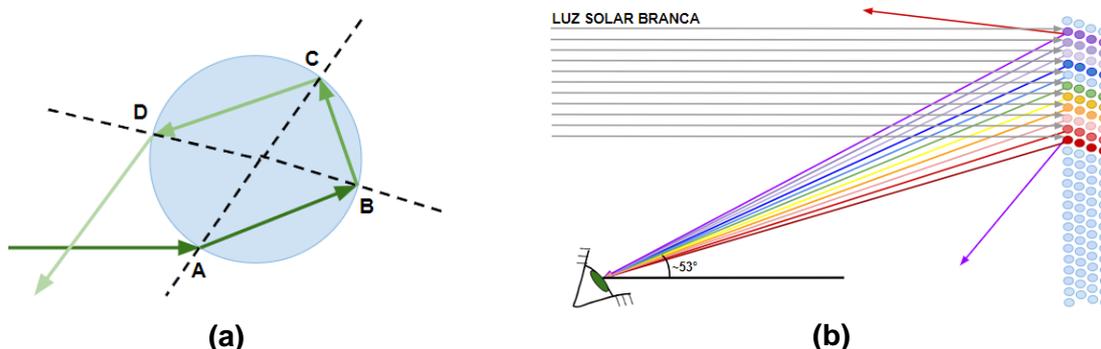
Fonte: o autor.

O ponto em que os raios coloridos chegam ao olho do observador é chamado de antissolar. Este ponto é o vértice do cone definido pelo arco-íris.

Volte até a Atividade I da Parte 01 deste material didático. A imagem III mostra não apenas um, mas dois arco-íris. Um deles, mais interno, é também o mais intenso. Já o de fora é menos intenso e tem as cores invertidas com relação ao primeiro.

Isso ocorre em virtude de mais uma reflexão interna na gota de chuva, fazendo com que o caminho da luz dentro da água continue, mesmo com menos intensidade. Na próxima refração para fora da gota, haverá as mesmas condições para a formação de um segundo arco-íris que denominamos de **secundário**.

Figura 33: Arco-íris secundário. (a) Comportamento dos raios de luz no interior da gota; (b) Percepção do observador do arco-íris secundário.



Fonte: o autor.

Para que seja visualizado pelo observador, o ângulo que o feixe colorido forma com a horizontal deve estar entre o intervalo de  $50,1^\circ$  a  $53,2^\circ$ .

É importante ressaltar que o raio de luz continua sendo refletido dentro da gota. Logo, existem arco-íris terciários, quaternários e etc. Contudo, em virtude de

que a cada reflexão o feixe perde intensidade, dificilmente estes podem ser observados.

## EXERCÍCIOS

1) Os fenômenos envolvidos na formação do arco-íris são:

- Reflexão, refração e ressonância;
- Refração, dispersão e reverberação;
- Reflexão, refração e dispersão;
- Difração, remoção e polarização.

2) Quando um feixe de luz branca incide sobre uma gota de chuva,

- a componente violeta desvia mais que a vermelha;
- a componente vermelha desvia mais que a violeta;
- todas as componentes refratam da mesma maneira;
- as componentes só serão separadas na próxima refração, da água para o ar.

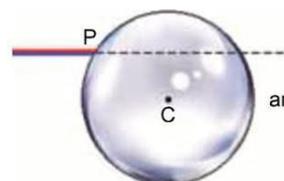
3) (UFJF-MG) O arco-íris é causado pela dispersão da luz do Sol que sofre refração e reflexão pelas gotas de chuva (aproximadamente esféricas). Quando você vê um arco-íris, o Sol está:

- na sua frente.
- entre você e o arco-íris.
- em algum lugar atrás do arco-íris.
- atrás de você.
- em qualquer lugar, pois não importa a posição do Sol.

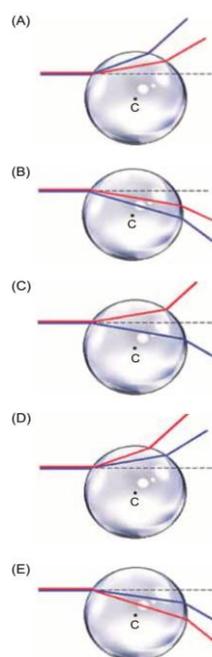
4) (FAMERP 2017) Dois raios de luz monocromáticos provenientes do ar,

um azul e o outro vermelho, incidem no ponto P da superfície de uma esfera maciça de centro C, paralelos um ao outro, na direção da linha tracejada indicada na figura.

A esfera é feita de vidro transparente e homogêneo.

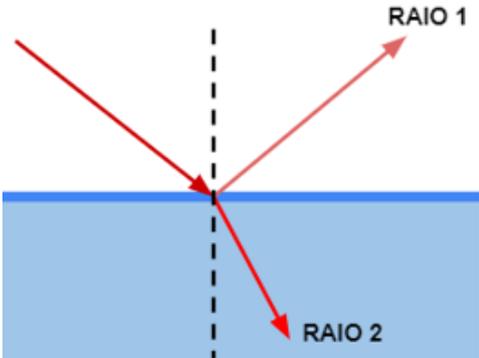


Se o índice de refração absoluto do vidro é maior para a cor azul do que para a vermelha e se não houve reflexão total dentro da esfera, a figura que representa corretamente a trajetória desses raios desde a sua incidência no ponto P até a sua emergência da esfera está indicada em



<b>PARTE</b>	<h1 style="margin: 0;">09 QUESTIONÁRIO FINAL</h1>
<h1 style="margin: 0;">09</h1>	

1) Observe a imagem abaixo. Ela ilustra dois fenômenos ópticos que ocorrem ao mesmo tempo.

<p style="text-align: center;">Figura 34: Fenômenos ópticos.</p>  <p style="text-align: center;">Fonte: o autor.</p>	<p><b>a)</b> Qual é o nome do fenômeno que originou o raio 1?</p> <p>( ) Reflexão ( ) Refração</p> <p><b>b)</b> Qual é o nome do fenômeno que originou o raio 2?</p> <p>( ) Reflexão ( ) Refração</p>
--	---

2) Use **todas as linhas** abaixo para descrever o que ocorre no fenômeno da **refração** da luz.

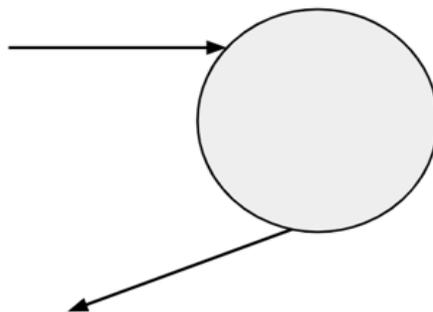
.....

.....

.....

.....

3) A ilustração abaixo representa uma gota de chuva que recebe a luz branca proveniente do Sol. Use seus conhecimentos e desenhe a trajetória da luz quando ela passa pela água.





APÊNDICE	<b>FUNDAMENTAÇÃO DO MATERIAL</b>
<b>I</b>	

Temos plena consciência de como é o ambiente em sala de aula. Com muita frequência, entramos, fazemos a chamada e explicamos o conteúdo até o sinal bater. Se der tempo, fazemos exercícios e os corrigimos antes de nos despedirmos.

Como professores, até temos noção, pelo nível de participação dos nossos estudantes durante a aula, se a turma compreendeu o que foi dito ou não. Contudo, é muito difícil ter certeza se todos os alunos aprenderam a matéria da mesma forma. Sendo um pouco mais pessimista, sem uma avaliação muito bem estruturada, não temos como saber nem se houve aprendizagem.

**Como explicar o mesmo conteúdo, da mesma forma, para alunos que são tão diferentes entre si?** Cada um tem um ritmo distinto, da mesma forma que a particularidade de como percebem a matéria raramente se repete. Este é um problema antigo e que exige urgência em ser superado.

A disciplina de física é uma das que mais “castigam” nossos estudantes. Além de exigir grande abstração por parte deles para entender a teoria, é também uma área do conhecimento que se utiliza da matemática como principal linguagem para descrever os fenômenos naturais. Para ela, elaborar uma estratégia diferente para alcançar todos os estudantes é algo necessário e que buscamos propor neste material didático.

Já deixamos claro, logo de começo, que tentaremos fugir do que normalmente é conhecido como “aula tradicional”. Em nossa proposição, o professor perderá o papel de protagonista único do processo educativo e se juntará ao aluno, guiando-o através dos conhecimentos.

“Conhecendo o arco-íris” tem fundamentação teórica que reflete duas teorias principais. Uma delas é a Teoria da Instrução de Jerome Bruner. A outra, por sua vez, é a da Criação do Conhecimento Real Exterior, de Gerson K. Cruz. Dedicaremos alguns parágrafos para que o leitor conheça, em linhas gerais, as características mais evidentes de cada uma delas. Na sequência, faremos comparações que evidenciam as semelhanças entre as teorias. São justamente estes pontos em comum que justificam a existência deste material.

Para Bruner, o que se busca é o crescimento intelectual (2006, p. 19). Ele será expresso pela capacidade que o aluno tem de progredir entre formas de representação de um conhecimento. Mas quais formas são essas?

A representação ativa diz respeito ao manuseio de objetos, ao contato direto do aluno com aquilo que está sendo estudado. Na sequência, surge a representação icônica. Nela, o estudante traduz o conhecimento na forma de imagens e não precisa mais manipular o ambiente. Operações mentais já podem ser realizadas para a resolução de problemas.

A terceira representação, por sua vez, é a simbólica. Ela é a mais importante pois reflete o auge da forma como o indivíduo domina o conhecimento. Nela há um avanço tão expressivo que o aluno já está familiarizado e faz uso de símbolos que são específicos daquele conhecimento (Moreira, 1999, p. 84).

É importante perceber que para alcançar o nível das representações simbólicas, faz-se necessário que o indivíduo domine bem as formas anteriores (ativa e icônica). Assim, a escola deve oportunizar experiências que façam com que os estudantes evoluam de forma em forma até alcançar o crescimento intelectual almejado.

Bruner é conhecido, entre outras coisas, por ser o pai da “aprendizagem por descoberta”. Esta estratégia se notabiliza por tentar simular, dentro do ambiente de sala de aula, o trabalho do cientista em seu laboratório. Lá, ele faz uso do método científico que o obriga a reconhecer um fenômeno, elaborar hipóteses, testá-las e confirmá-las (2008, p. 88).

Nesse contexto, o aluno teria função semelhante. Ele entraria em contato com um fenômeno através de seus sentidos e elaboraria uma explicação. Através da prática experimental, esta hipótese seria testada e analisada a partir dos dados coletados. Contudo, para que uma hipótese seja boa, o estudante tem de dominar bem como representar o conhecimento estudado, manipulando seus símbolos e comunicando para os outros as suas descobertas.

A Teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior vai em um sentido muito parecido quando destaca a importância da emissão de hipóteses no processo de aprendizagem. Gerson K. Cruz evidencia a existência de três tipos de conhecimento: do inconsciente, da mente e real exterior.

O primeiro deles é um conhecimento real e permanente, isto é, é um conhecimento que está armazenado no inconsciente e pode ser recuperado. Contudo, só temos acesso a ele quando o transportamos para a mente. Nesta fase, o conhecimento será virtual e temporário. É justamente nesse transporte que reside o

ato de pensar: para poder utilizar uma informação, o indivíduo deve ativar seus mecanismos de busca para resgatar o conhecimento de seu inconsciente e manipulá-lo (2016, p. 61). Aprender, para esta teoria, significa justamente saber realizar a busca no inconsciente.

Os mecanismos de busca aos quais nos referimos anteriormente podem ser variados: uma simples pergunta que se faça ao inconsciente já pode ser suficiente para trazer à tona algumas informações. Contudo, Gerson K. Cruz afirma que o principal mecanismo que temos à disposição é a emissão de hipóteses que fazemos quando nos defrontamos de um problema desafiador (2016, p. 144).

Estas hipóteses serão emitidas à medida que o inconsciente manda para a mente as informações armazenadas lá, o que faz com que um problema desafiador seja uma forma extremamente efetiva de ativar nossos mecanismos de busca.

Já é possível notar que ambas as teorias colocam a emissão de hipóteses em um papel central no aprendizado. Segundo Cruz, são elas que permitem que os conhecimentos aprendidos e guardados em nosso inconsciente possam ser manipulados. Todavia, emitir uma boa hipótese só será possível se o indivíduo dominar bem as formas de representação de Bruner.

Mas quais são as mudanças que temos de fazer em sala de aula para que as diretrizes dadas por essas teorias sejam, de fato, implementadas?

A Teoria da Instrução de Bruner apresenta a vantagem de ser, segundo o próprio autor (2006, p. 51), “prescritiva” e “normativa”. Isso pois apresenta uma série de características que são indispensáveis para a prática didática: há de se ter predisposições (motivação), estrutura, sequência e reforçamento.

Para Bruner, o ambiente de exploração de alternativas deve ser motivador. Ademais, o professor deve ajustar a estrutura e a sequência da prática para que o estudante evolua por entre os modos de representação. Ao final, o aluno deve ser recompensado por sua evolução. Contudo, o autor afirma que é preferível que tal recompensa seja intrínseca, isto é, que o estudante se sinta feliz por ter alcançado certa competência (BRUNER, 2008, p. 97).

Tanto para Bruner quanto para Cruz, o papel do professor é bastante semelhante: é ele quem irá oportunizar a experiência de o aluno entrar em contato com um corpo de conhecimentos (através de um problema desafiador) e emitir suas hipóteses. Será um guia que facilitará a aprendizagem por descoberta (BRUNER, 2008, p. 104), auxiliando o estudante a incorporar e manipular formas de representações mais refinadas. Ele é o agente que irá direcionar o aluno em sua investigação (CRUZ, 2016, p. 153).

Isso tudo deverá ser feito em um cenário preparado para a investigação científica. Desta forma, defendemos a transformação da sala de aula em um “ambiente de aprendizagem”. Este local deve ajudar os estudantes a focar suas atenções apenas no estudo e na investigação e, sobretudo, propiciar a troca de informações entre os colegas (GAUTÉRIO; RODRIGUES, 2013, p. 614).

É condição para a existência de um ambiente de aprendizagem que haja ferramentas para que os alunos explorem as alternativas, testem suas hipóteses e confirmem ou não suas teorias. O conceito deste cenário que busca romper com a sala de aula tradicional cai como uma luva nos preceitos da aprendizagem por descoberta defendida por Bruner.

O material “Conhecendo o arco-íris” está alinhado com aquilo que há de mais importante nas teorias descritas nos parágrafos acima. Focamos em oferecer um conjunto de fascículos com estrutura e sequência pensadas para, gradualmente, o aluno evoluir em seus modos de representação do conhecimento. Além disso, oferece momentos específicos em que os estudantes terão de lançar mão de hipóteses antes de prosseguir em seus estudos.

Nas páginas deste produto educacional, você professor irá encontrar práticas experimentais e computacionais que buscam não apenas fazer com que o aluno confirme suas teorias sobre o arco-íris, mas também oportunizem momentos em que o vocabulário científico e o uso dos símbolos inerentes a esse estudo serão de grande importância.

Será principalmente o uso deste vocabulário e sistema de símbolos que servirá de material para avaliarmos se os modos de representação estão sendo ou não incorporados.

Os planos de aula para cada uma das partes deste material apresentam encaminhamentos pensados no sentido de direcionar a prática até o completo domínio dos conhecimentos, habilidades e competências que julgamos relevantes neste estudo. Contudo, a depender da sua realidade, você professor tem liberdade de fazer adaptações na forma como os fascículos serão utilizados.

Para mais detalhes sobre as teorias que fundamentam “Conhecendo o arco-íris”, recomendamos a consulta à dissertação a qual este produto educacional se relaciona. Além dela, os livros e artigos referenciados são leitura obrigatória para quem desejar ter noção global a respeito de nossa fundamentação teórica.

APÊNDICE	
<b>II</b>	<b>PLANOS DE AULA</b>

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 01</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	2 hora/aula (100 min.)
<b>Assunto:</b>	
Refração, refração e dispersão.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisar imagens e ilustrações a partir da observação;</li> <li>• Identificar relações entre grandezas físicas utilizando um simulador computacional.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constatar a diferença entre os fenômenos de reflexão e refração da luz;</li> <li>• Elaborar sínteses escritas a partir da observação de fenômenos ópticos ilustrados e simulados.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>A aula tem início com a apresentação da proposta aos estudantes, enfatizando o uso do fascículo e combinando como as atividades irão se desenvolver. Após todas as dúvidas serem sanadas, o professor deve explicar a intencionalidade do projeto, destacando que ele propõe uma abordagem de tópicos de óptica através do estudo do fenômeno do arco-íris.</p> <p>Esta etapa de preparação se encerra com a entrega do fascículo “Parte 01” a todos os estudantes.</p> <p>Em seguida, com o uso do projetor multimídia, os alunos serão convidados a observar as três imagens da “Atividade I” e responder as perguntas relacionadas a cada uma delas e ao “Refleta &amp; responda”. Cerca de 5 minutos é tempo suficiente para que seja feita a análise de cada imagem.</p> <p>Na “Atividade II”, os alunos devem acessar o simulador “Desvio da Luz”, produzido pelo PhET Colorado. O recomendável é que se utilize uma sala de informática para o uso do programa. Entretanto, se não houver esta disponibilidade, os estudantes podem utilizar o celular. A simulação é produzida em HTML5 e não deve haver dificuldade em rodar em <i>smartphones</i>. Para acessá-lo, é necessário apenas que o aluno leia o QR Code disponível.</p> <p>A atividade tem continuidade seguindo as instruções do material didático e o estudante deve responder a todas as perguntas a partir de suas próprias conclusões.</p>	
<b>Avaliação:</b>	

Esta primeira parte traz diversas perguntas a respeito de fenômenos ópticos conhecidos do dia-a-dia. Além delas, faz questionamentos acerca de conhecimentos que podem ser construídos com o uso do simulador proposto. Desta forma, estas respostas podem ser utilizadas como instrumento de avaliação diagnóstica.

#### Recursos didáticos:

Fascículo Parte 01 do material “Conhecendo o arco-íris”, projetor multimídia, computadores (notebooks ou desktop) ou celular *smartphone* e materiais para anotação: caderno, lápis e caneta.

#### Bibliografia:

MENEZES, Luana Paula Goulart de *et al.* Um olhar científico para o arco-íris. **Revista Pontes**, Paranaíba, v. 6, p. 96-110, 10 nov. 2019.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV**: Ótica e física moderna. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

#### Observação:

- Na apresentação da proposta, o professor deve deixar claro que está se criando na sala de aula um “ambiente de aprendizagem”. As carteiras podem ser dispostas de modo a formar duplas ou trios, desde que estes estejam comprometidos com a realização das atividades;
- Na Atividade I, os estudantes devem ser incentivados a utilizar suas próprias palavras para descrever as imagens e dar explicações sobre elas. O material recolhido aqui servirá de parâmetro, no fim da implementação do projeto, para conferir se a estratégia empregada logrou êxito ou não;
- Nesta mesma atividade, os alunos terão de emitir hipóteses sobre os fenômenos observados no material. Em virtude do pouco contato com os assuntos estudados (e com suas formas de representação), espera-se que tais hipóteses não tenham ainda o fundamento desejado;
- O simulador da Atividade II deverá ser usado conforme estabelece o roteiro disponibilizado no fascículo. Contudo, o professor deve deixar claro que o estudante tem liberdade para explorar outras funcionalidades do programa;
- Logo no início da Atividade II, é **imprescindível** que o docente comente sobre as limitações do simulador. Ele deve deixar claro que se trata de um programa computacional simplificado que pode não representar a realidade em sua totalidade;
- Não é recomendável que o professor faça comentários que induzam o aluno a responder as perguntas da forma correta. Nesta etapa, ele deve deixar que o aluno preencha os questionamentos de sua maneira. Este cuidado deve ser tomado principalmente nas questões que exigem do aluno alguma explicação e/ou formulação de hipóteses;
- As atividades serão corrigidas somente na aula posterior.

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 02</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	1 hora/aula (50 min.)
<b>Assunto:</b>	
Reflexão, refração e dispersão.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretar e criticar um artigo de ciências veiculado em um portal da internet;</li> <li>• Propor um modelo explicativo para um fenômeno físico e comunicá-lo através de uma ilustração.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconhecer algumas das principais características dos fenômenos da reflexão e da refração da luz.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>O início deste encontro se dará com a síntese dos conhecimentos construídos na aula anterior. O professor deve dialogar com os estudantes sobre os encaminhamentos da Parte 01 e obter deles respostas simplificadas para algumas perguntas que foram feitas. Trata-se apenas de uma conversa em que os estudantes darão explicações sobre como acreditam que se forma o arco-íris.</p> <p>Após este primeiro momento, os alunos devem receber o fascículo Parte 02. Nele, irão realizar a leitura de um texto de ciências cujo objetivo é explicar sobre a formação de um arco-íris. O professor deve pedir para que sejam feitas duas leituras: uma primeira mais rápida e outra com o marca-texto nas mãos, grifando as informações mais relevantes. Estes dados devem ser transcritos no caderno.</p> <p>Para o fechamento da aula, os estudantes são solicitados a realizar a Atividade III. Nela, devem desenhar o que presumem ser o caminho de um raio de luz proveniente do Sol dentro de uma gota de chuva.</p>	
<b>Avaliação:</b>	
<p>A avaliação desta aula deve ser feita em dois momentos: a primeira delas no início do encontro, quando da retomada dos conteúdos vistos anteriormente. Será abordagem oral, mas muito importante para que o processo possa continuar. Este é um momento em que os estudantes vão verbalizar suas conjecturas. A segunda, por sua vez, se dará ao fim da aula, com os desenhos da Atividade III. Se ele estiver atento à leitura do texto proposto, há uma tendência maior de que ele seja um tanto mais certo em sua ilustração.</p>	

**Recursos didáticos:**

Fascículo Parte 02, marca-texto e instrumentos de anotação: lápis, borracha, caneta e caderno.

**Bibliografia:**

MENEZES, Luana Paula Goulart de *et al.* Um olhar científico para o arco-íris. **Revista Pontes**, Paranaíba, v. 6, p. 96-110, 10 nov. 2019.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

**Observação:**

- Neste encontro o estudante começará a ter contato com os nomes dos fenômenos físicos por trás do arco-íris. Ainda não é o momento de se entrar em detalhes específicos sobre cada um deles;
- Na Atividade III, o professor não deve dar pistas sobre como é o desenho da gota de chuva. Ele também não deve dizer se a ilustração está correta ou não;
- O aluno mais atento tende a traduzir algumas informações do artigo lido em seu desenho. Todavia, como o estudante ainda não teve contato direto com o fenômeno, manuseando-o em um experimento, neste momento não se espera que suas hipóteses sejam bem fundamentadas.
- Os conceitos só serão aprimorados nas aulas posteriores. Desta forma, não há a necessidade de se realizar correções ao fim do encontro.

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 03</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	2 hora/aula (100 min.)
<b>Assunto:</b>	
Formação do arco-íris.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organizar, sistematizar e executar uma prática experimental proposta;</li> <li>• Reconhecer, a partir de um experimento, os padrões observáveis em um fenômeno físico.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constatar, experimentalmente, a forma como os fenômenos ópticos se relacionam para a formação do arco-íris;</li> <li>• Descrever, utilizando o vocabulário cientificamente aceito, o comportamento de um raio de luz dentro de uma gota de chuva;</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>A aula tem início com a entrega do fascículo Parte 03 para os estudantes. Neste, cada equipe irá encontrar um roteiro para uma prática experimental que tem como objetivo familiarizar os alunos com os fenômenos ópticos que ocorrem quando uma gota de chuva é interceptada por um raio de luz. Neste primeiro momento, o raio de luz será proveniente de um <i>laser pointer</i> verde. Entretanto, é prudente o professor deixar claro que no futuro a mesma prática será executada, mas desta vez com uma lanterna de luz branca. É prudente que haja um alerta, por parte do docente, dos cuidados no manuseio da luz laser, já que ela pode causar danos à visão se for manipulada incorretamente. A sala de aula deve ser previamente preparada com os materiais que também estão listados no roteiro.</p> <p>Os grupos devem seguir os procedimentos dos experimentos com base nas descrições e imagens disponíveis, enquanto o professor e o monitor (se houver) caminham pela sala para auxiliar nas dúvidas.</p> <p>A análise deve ter por base as seguintes etapas:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Preparação: recorte do EVA para a base de experimentação e vedação do copo, construção do suporte para o <i>laser</i> e preparação do copo com água.</li> <li>2. Experimentação: posicionamento do copo sobre a base e do <i>laser</i> sobre o suporte, realização do experimento com marcação dos raios de luz com os alfinetes e utilização da régua para desenhá-los.</li> </ol>	

Após os grupos executarem as duas etapas, cada aluno deve responder ao "Refleta & responda" individualmente.

O tempo sugerido para a execução da etapa 1 (preparação) é de uma aula. A segunda aula deve ser destinada para o cumprimento da etapa 2 e da resposta ao questionamento.

#### **Avaliação:**

A forma como os alunos se comportam quando instados a seguir o roteiro é um ponto de atenção no quesito avaliação. O professor deve se atentar se eles são capazes de seguir cada um dos procedimentos, interpretando as descrições e relacionando-as com as imagens. A resposta ao "Refleta & responda" nesta etapa já pode ser considerada como um primeiro parâmetro de que o estudante está internalizando os nomes dos fenômenos e a forma como eles se combinam na formação do arco-íris.

#### **Recursos didáticos:**

Fascículo Parte 03, projetor multimídia, materiais para registro: caneta, lápis, borracha e caderno, e material para experimentação listado no fascículo.

#### **Bibliografia:**

MENEZES, Luana Paula Goulart de *et al.* Um olhar científico para o arco-íris. **Revista Pontes**, Paranavaí, v. 6, p. 96-110, 10 nov. 2019.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

#### **Observação:**

- O professor deve permitir que os estudantes manuseiem os materiais até que consigam realizar o que é pedido pelo roteiro. É necessário que os próprios alunos interpretem os procedimentos, tendo em vista que um dos nossos objetivos é fazer com que eles se familiarizem com os fenômenos;
- Uma vez que a prática envolve o uso de um feixe colimado de luz, é necessário avisar os estudantes a respeito do perigo em mirar o *laser* no próprio olho ou de um colega;
- Esta deverá ser a primeira vez que os alunos irão manusear o experimento e ter contato com a reflexão e a refração. Após o domínio deste primeiro modo de representação, poderemos esperar melhores hipóteses no futuro;
- Antes de serem solicitados a responder ao "Refleta & responda", é interessante que o professor provoque os alunos acerca de seus resultados. Apontar para o raio refratado para dentro da gota e perguntar "Como é o nome desse fenômeno mesmo?" e "o que está acontecendo com a luz nesse ponto?" são boas pedidas;
- Por mais que não sejam utilizados nesta aula, a presença de transferidores no ambiente de aprendizagem pode ser um bom fator de incentivo para as atividades que serão executadas futuramente.

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 04</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	1 hora/aula (50 min.)
<b>Assunto:</b>	
Reflexão e refração aplicadas ao fenômeno do arco-íris.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observar padrões e elaborar modelos que expliquem um fenômeno físico explorado em uma prática experimental;</li> <li>• Utilizar a linguagem científica adequada, clara e objetiva, para se referir a conceitos físicos.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisar a prática experimental executada durante a aplicação da Parte 03;</li> <li>• Constatar a validade das leis da reflexão e refração a partir da prática experimental;</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>A sala deve ser novamente disposta como um ambiente de aprendizagem. Neste cenário, os estudantes serão organizados nas mesmas equipes da Parte 03. Sobre suas mesas, materiais como papel, régua, alfinetes, transferidor, lápis e caneta são imprescindíveis. O professor deve pedir para que os alunos sigam com cuidado as etapas descritas no material. As equipes devem executar, de maneira sequencial, a marcação do centro da gota circular, traçar a reta normal no primeiro ponto de incidência da luz com a circunferência, medir e anotar os ângulos de incidência e refração.</p> <p>Para encerrar, outra medição estará voltada para confirmar uma das leis da reflexão. No ponto da primeira reflexão da luz na superfície interna da gota, os alunos irão marcar a reta normal e usar o transferidor para obter o valor dos ângulos de incidência e reflexão. Se o experimento foi feito de forma adequada, os referidos ângulos devem ser iguais.</p> <p>Uma discussão deve ser feita com toda a turma ao fim do encontro, procurando evidenciar a validade das leis físicas estudadas e sanar possíveis dúvidas que ainda existam sobre os temas.</p> <p>Ao final da aula, o professor deve recolher a folha com os ângulos marcados.</p>	
<b>Avaliação:</b>	

Os dados encontrados pelos alunos durante a medição podem ser utilizados como forma de avaliar se os procedimentos foram feitos de maneira adequada. Contudo, é seu envolvimento nas discussões que evidencia se os conceitos estão sendo corretamente incorporados. O início de um uso assertivo do vocabulário científico para se referir às retas, ângulos, leis e princípios estudados é o que se objetiva encontrar ao fim deste encontro.

#### Recursos didáticos:

Fascículo Parte 04, folha com os dados coletados na Parte 03, transferidor, régua, caneta, lápis, borracha, celular para pesquisa e/ou tabela de senos.

#### Bibliografia:

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 406 p.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

#### Observação:

- Esta prática vem no sentido de mostrar aos estudantes, a partir do uso de números, as leis da reflexão e dados que permitam, no futuro, compreender a refração;
- É sempre prudente que o professor transite entre as mesas e se certifique de que o uso do transferidor está sendo feito de maneira adequada. A reta utilizada como referência para medição com este instrumento também deve ser a correta;
- Durante as conversas com os grupos, o docente deve prezar para o uso correto do vocabulário científico. Perguntar “como é o nome desse raio?”, “Qual é o nome desse ângulo?” e “qual é o valor do ângulo de refração?” são questionamentos importantes para que o aluno também se comunique através desses códigos;
- Em atividades posteriores, os estudantes deverão realizar um experimento parecido com aquele que foi executado. Contudo, o roteiro virá com menor número de ilustrações e mais descrições que se valham da simbologia e dos nomes que estamos tratando. Por isso da necessidade de se ater a este detalhe;
- Caso as equipes não alcancem resultados satisfatórios, cabe ao professor discutir possíveis motivos que impactaram nos erros experimentais.

PLANO DE AULA	
PARTE 05	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	4 hora/aula (200 min.)
<b>Assunto:</b>	
Reflexão e refração da luz.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconhecer a importância e interpretar o papel das grandezas físicas no modelo teórico que explica dado fenômeno;</li> <li>• Compreender leis e teorias físicas, associando-as com a prática;</li> <li>• Comunicar-se a partir do sistema de códigos e símbolos adequado.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formular as leis da reflexão e da refração da luz;</li> <li>• Calcular o índice de refração da água a partir de dados coletados na prática experimental.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>Os momentos desta aula estarão voltados para o estudo acerca dos fenômenos ópticos da reflexão e da refração da luz. Os estudantes já tiveram contato com eles tanto em outros momentos da vida, quanto no experimento que veio com os fascículos Parte 03 e 04.</p> <p>Antes de distribuir o novo capítulo para os estudantes, é missão do professor lembrar os alunos do que está sendo feito e as conclusões obtidas por eles no encontro anterior. Suas contribuições devem ser incentivadas e anotadas na lousa.</p> <p>Após este primeiro momento, o fascículo Parte 05 deve ser entregue para todos os alunos, que serão solicitados a fazer a leitura a respeito da reflexão da luz e as leis que guiam este fenômeno. É prudente que os estudantes usem seus marca-textos para destacar as principais ideias.</p> <p>Após a leitura, haverá o momento de uma aula expositiva dialogada sobre o mesmo tema. Para tanto, o docente pode fazer uso dos <i>slides</i> sugeridos no apêndice IV. É prudente que durante a conversa com os alunos sejam feitas referências sobre o experimento executado na prática anterior.</p> <p>O mesmo processo será repetido para a refração da luz. A leitura do texto presente no fascículo será sucedida pela exposição dos principais tópicos deste assunto - principalmente aqueles que envolvem cálculo, como o do índice de refração de um meio e a lei de Snell-Descartes.</p>	

Encerrada a exposição, o docente deve devolver aos alunos seus trabalhos dos encontros anteriores (a ilustração da gota, com os ângulos marcados) e construir uma tabela na lousa para anotar os resultados obtidos.

<b>Equipe</b>	<b>i</b>	<b>sen(i)</b>	<b>r'</b>	<b>sen(r')</b>	<b>n(ar)</b>	<b>n(água)</b>
01						
02						
03						
04						

Nela, cada equipe pode expor seus dados. Com o uso apropriado da Lei de Snell-Descartes, espera-se que o índice de refração da água calculado pelos grupos esteja em torno de 1,33.

Para finalizar, os alunos deverão realizar uma bateria de exercícios tanto sobre reflexão quanto sobre refração da luz. Eles podem sentar em equipes e realizar a resolução de maneira colaborativa.

#### **Avaliação:**

A participação dos alunos durante as discussões é um ponto de atenção muito importante. Neste momento da aplicação do conjunto de fascículos eles já devem saber descrever os fenômenos de reflexão e refração e, por este motivo, espera-se deles mais empenho durante a conversa com o professor.

As respostas aos exercícios presentes no fim da Parte 05 também exprimem se o conjunto de códigos matemáticos estudados durante estas aulas foram devidamente incorporados pelos estudantes.

#### **Recursos didáticos:**

Fascículo Parte 05, projetor multimídia e material para registros: caderno, caneta, lápis, borracha e marca-texto.

#### **Bibliografia:**

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 406 p.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Ótica, relatividade, física quântica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1998. 437 p. v. 4.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

**Observação:**

- Durante o momento destinado à leitura, o professor deve se esforçar para manter o ambiente em silêncio e cobrar dos estudantes o apego à definição dos conceitos estudados;
- Mesmo com essa cobrança, é prudente tranquilizar os alunos a respeito de que os detalhes mais complicados serão explicados adiante;
- Comentários sobre os experimentos devem ser feitos enquanto a teoria é explicada. Quando estas contribuições partirem dos próprios alunos, é salutar aproveitar as palavras dos estudantes para fazer correções ou enfatizar conceitos relevantes que estão sendo, aos poucos, incorporados por eles;
- Este é um momento bastante importante para que os alunos evoluam do manuseio dos objetos de conhecimento (via experimentação) para o uso de imagens que os representem. Além disso, a incorporação de códigos que fazem parte da simbologia deste estudo já começa a aparecer;
- O uso dos *slides* é recomendável, porém anotações na lousa são incentivadas. Alguns dos cálculos presentes no estudo da refração podem causar desconforto para parte dos estudantes e, por conta disso, exigem análise mais detalhada;
- No momento destinado para a aplicação da Lei de Snell-Descartes é importante que os estudantes compreendam o uso da equação matemática, substituindo os dados assertivamente;
- A explicação do professor não precisa contemplar necessariamente toda a matéria presente neste fascículo, mas sim apenas aquilo que for mais importante para o prosseguimento das atividades;
- Enquanto os grupos respondem aos exercícios, o professor pode escutar as dúvidas e direcionar o caminho para a resolução se aproveitando das ideias dos alunos. Mas não deve, em nenhuma hipótese, dar a resposta;
- Os alunos podem participar ativamente da correção dos exercícios, fazendo uso da lousa se sentirem confiantes para isso. Um debate entre os grupos a respeito das justificativas de suas respostas é o que se deseja.

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 06</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	2 hora/aula (100 min.)
<b>Assunto:</b>	
Reflexão e refração aplicadas ao fenômeno do arco-íris.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propor modelos que busquem explicar a existência de um fenômeno físico;</li> <li>• Compreender roteiros experimentais que façam uso de códigos e nomenclaturas próprias do objeto de estudo.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar o ângulo de desvio do raio de luz para a formação do arco-íris;</li> <li>• Executar novamente a prática da Parte 03 com um número reduzido de detalhes no roteiro.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>O encontro se inicia com a entrega do fascículo Parte 06 para os estudantes, que mais uma vez estarão reunidos em grupos. Suas bancadas deverão estar previamente preparadas com o material que será utilizado neste novo experimento.</p> <p>Na realidade, não se trata de um “novo experimento”, mas sim de uma revisita àquilo que já foi feito na Parte 03. Desta vez, contudo, o <i>laser</i> de luz verde dá lugar à lanterna de luz branca que representará os feixes provenientes do Sol. Além desta adaptação, nota-se pela leitura do fascículo que as descrições das etapas são mais simplificadas e não possuem imagens.</p> <p>O desenrolar da aula ocorrerá de acordo com o que é pontuado no roteiro; tão logo, o professor deve pedir atenção dos grupos em cada um dos momentos do experimento. As equipes poderão aproveitar parte dos materiais confeccionados na prática anterior. Sequencialmente, os alunos irão dispor a lanterna de frente ao copo, identificar os feixes coloridos na folha de papel, marcar estes e o raio incidente com alfinetes, traçar retas normais e medir os ângulos de interesse com o transferidor. Todas estas etapas são semelhantes ao que já foi visto no passado.</p> <p>Entretanto, há aqui um detalhe a mais. Com base nas descrições do fascículo, os grupos também terão de medir o desvio sofrido pelo raio de luz que representa o arco-íris primário.</p> <p>Há espaço para que os alunos executem novamente o cálculo do índice de refração da água. Basta que se utilize a lei de Snell-Descartes.</p>	

Após todas as medidas serem realizadas, o professor deve realizar uma discussão sobre as principais dificuldades enfrentadas pelos grupos durante o experimento, a relação dos fenômenos de refração e reflexão com a formação do arco-íris e o ângulo para que ele possa ser visualizado.

#### **Avaliação:**

A facilidade com que os integrantes dos grupos executam o experimento é um bom indicativo de que os alunos estão atingindo os objetivos projetados para eles. Tendo em vista que a prática traz poucas novidades com relação ao que já foi executado, um bom rendimento neste momento pode significar que as etapas, símbolos e nomes estão sendo incorporados. Com a ausência de imagens nas descrições das etapas e maior empenho para se entender o que está escrito no roteiro, o aluno que conseguir cumprir suas tarefas dá indícios de que está evoluindo em suas formas de representação do conhecimento.

#### **Recursos didáticos:**

Fascículo Parte 06, materiais para registro: caneta, lápis, borracha e caderno, e material para experimentação listado no fascículo.

#### **Bibliografia:**

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física:** eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 406 p.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV:** Ótica e física moderna. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

#### **Observação:**

- Desta vez os alunos deverão estar mais livres para executar o experimento. O professor deve apenas acompanhar o trabalho e evitar que erros muito graves coloquem em risco toda a coleta de dados;
- As descrições das etapas no fascículo estão mais simplificadas e há uma justificativa para isso. Neste momento, já esperamos que os estudantes conheçam os termos corretos e lembrem dos procedimentos semelhantes que já foram feitos no passado;
- O cálculo do índice de refração através da Lei de Snell-Descartes é outro exemplo da ausência de dicas do material. Observe que o campo destinado para esta determinação não traz mais a equação necessária. Novamente, é o aluno quem deve lembrar da expressão matemática (ou onde consulta-la) e como utilizá-la;
- Os grupos deverão entrar em consenso sobre o método empregado para se obter o desvio sofrido pelo raio de luz ao passar pela gota. O professor deve deixar com que os estudantes testem alternativas para medir este ângulo;
- Na discussão final, o docente deve deixar com que os estudantes produzam hipóteses a respeito do desvio  $\Delta$  e do porquê a luz branca se decompõe. Para

comunicar suas hipóteses, espera-se que os estudantes façam uso do vocabulário científico aprendido.

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 07</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	1 hora/aula (50 min.)
<b>Assunto:</b>	
Dispersão da luz branca.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisar, a partir do controle de variáveis em uma simulação, a influência de um fator sobre um fenômeno físico;</li> <li>• Conceber e utilizar modelos físicos, generalizando padrões observáveis.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constatar, a partir de uma simulação, os motivos para a ocorrência da dispersão da luz branca;</li> <li>• Comunicar suas conclusões sobre o fenômeno da dispersão fazendo uso do vocabulário científico.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>Este encontro é planejado para ser feito em uma sala de informática. Caso não haja a disponibilidade deste cenário, o professor pode abrir a possibilidade de os estudantes utilizarem seus celulares e disponibilizar acesso à internet.</p> <p>Logo após entregar o fascículo Parte 07, o docente deve questionar se os alunos já viram o fenômeno da dispersão em algum lugar que não na formação do arco-íris. Após breve discussão inicial, os grupos serão solicitados a entrar no simulador “Desvio da Luz”, conhecido desde a Parte 01.</p> <p>Nele, terão de seguir as etapas descritas. Elas contemplam, sequencialmente, a marcação do ângulo de refração para as cores vermelha e violeta e a utilização da Lei de Snell-Descartes para o cálculo do índice de refração da água para estas duas cores do espectro visível.</p> <p>De posse desses dados, os estudantes poderão concluir que o índice de refração do meio muda se a cor do raio de luz mudar; isto é, o desvio angular sofrido pelo vermelho e pelo violeta é diferente.</p> <p>A aula se encerra com o tempo para que se preencha, individualmente, o “Refleta &amp; responda”. O que os alunos escreverem neste campo servirá de base para o início do próximo encontro.</p>	
<b>Avaliação:</b>	

Não esperamos que os alunos tenham muita dificuldade em realizar as tarefas propostas neste momento. Tendo em vista que eles já conhecem o *software* e já incorporaram os principais conceitos do estudo da refração, as respostas aos campos e questionamentos do fascículo devem sair naturalmente. A forma como se expressam no “Refleta & responda” dá novos indícios da familiarização com estes conhecimentos.

#### Recursos didáticos:

Fascículo Parte 07, computador e/ou celular com acesso à internet, materiais para registros: caderno, caneta, lápis e borracha.

#### Bibliografia:

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 406 p.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

#### Observação:

- Esta aula é bastante simples, mas muito importante na sequência que desejamos dar no entendimento dos alunos a respeito do arco-íris. Não é possível explicar este fenômeno sem compreender como e o porquê ocorre a dispersão da luz do Sol;
- No final do encontro relativo à Parte 06, os alunos tiveram que conceber hipóteses sobre a dispersão da luz branca. É conveniente, durante o contato com os grupos, verificar se as alternativas propostas por eles se confirmaram ou não;
- Seguindo de maneira correta o que é trazido pelo fascículo, os estudantes não devem ter dificuldade nem em manusear o *software*, tampouco em concluir sobre as causas que fazem a luz branca se decompor nas cores do arco-íris. É função do docente andar por entre os grupos, auxiliando na utilização do simulador e observando a forma como os alunos se referem aos raios, ângulos e demais conceitos;
- É bastante interessante perceber as relações que os próprios alunos vão fazendo a respeito da prática com o simulador e a formação do arco-íris. Frases do tipo “então é por isso que o arco-íris se forma?” devem ser comemoradas;
- O próximo encontro servirá para reunião de tudo o que foi visto para a explicação clássica sobre a formação do fenômeno. Desta forma, não há a necessidade de se encerrar esta aula com uma síntese dos conteúdos.

PLANO DE AULA	
PARTE 08	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	1 hora/aula (50 min.)
<b>Assunto:</b>	
A formação do arco-íris.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relacionar conceitos físicos para explicar um fenômeno observável;</li> <li>• Conceber e generalizar modelos que buscam explicar um fenômeno;</li> <li>• Fazer uso do sistema de símbolos e códigos adequados.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conhecer os princípios que fundamentam a formação dos arco-íris primário e secundário;</li> <li>• Resolver exercícios de fixação sobre os temas estudados.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>Nesta última aula teórica, vamos juntar todo o conhecimento construído até aqui. Nada visto neste encontro será novidade para os estudantes que acompanharam todas as etapas anteriores e cumpriram as atividades propostas. O professor deve entregar o fascículo Parte 08 para todos os alunos e iniciar a discussão a respeito do “Refleta &amp; Responda” da aula passada. O diálogo deve girar em torno do desvio diferente sofrido pelas componentes vermelha e violeta de um raio de luz branca, cujo resultado é o que chamamos de dispersão. Perguntas como “o vermelho e o violeta desviam da mesma forma?”, “o índice de refração é o mesmo para diferentes cores?” e “quem desvia mais quando a luz encontra a água? A vermelha ou a violeta?” são bons exemplos de como pode ser conduzida essa conversa.</p> <p>Com o uso do <i>datashow</i> para projetar os <i>slides</i> disponíveis no apêndice IV, uma aula expositiva dialogada se desenrolará. O docente deve mostrar que quando a luz do Sol intercepta uma gota de chuva, vermelho e violeta desviam de maneiras distintas, o que resulta na formação do feixe colorido.</p> <p>Em seguida, será mostrado para os estudantes que a forma como o arco-íris primário é percebido por um observador é um resultado combinado da dispersão em diversas gotas. E para que seja notado, o desvio sofrido pelos raios deverá estar em um intervalo específico.</p> <p>Para terminar a teoria, o arco-íris secundário será o centro das discussões. Fazendo associações com os experimentos e com aquilo que acabou de ser visto, deve ser fácil e rápido explicar este segundo arco visualizado nos céus.</p>	

Nos últimos momentos da aula, os alunos serão convidados a fazer quatro exercícios de múltipla-escolha dispostos no fascículo.

#### **Avaliação:**

Como foi dito na seção “Encaminhamentos”, esta aula será apenas a reunião formal de todos os conceitos vistos até aqui. Desta forma, a exposição do professor deverá contar com a participação ativa dos estudantes, contribuindo com respostas aos questionamentos do docente. Não há previsão, para esta Parte 08, de questões abertas que permitam os alunos demonstrar seu vocabulário científico que a esta altura já deve estar consolidado. Contudo, há alguns exercícios de múltipla-escolha que servem para reforçar os conceitos e destacar suas importâncias.

#### **Recursos didáticos:**

Fascículo Parte 08, projetor multimídia, lousa, giz e material para registro: lápis, caneta, borracha e caderno.

#### **Bibliografia:**

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 420 p. v. 4.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

MENEZES, Luana Paula Goulart de *et al.* Um olhar científico para o arco-íris. **Revista Pontes**, Paranaíba, v. 6, p. 96-110, 10 nov. 2019.

FLYNN, C. **What makes a rainbow? An explanation of atmospheric optical phenomena**. 2016. Disponível em: <https://blog.metservice.com/atmospheric-optics>. Acesso em: 11 março 2021.

#### **Observação:**

- Há a previsão de apenas uma aula para este fechamento teórico. Contudo, fica a cargo do professor decidir se há a necessidade de mais minutos para completar os conteúdos;
- Os alunos devem ter liberdade para contribuir com a aula, fazendo comentários pertinentes durante a exposição do professor. Isso deve ser incentivado. Os estudantes conhecem o conteúdo e, neste momento, terão apenas de conectar os conceitos com o auxílio do docente;
- É pertinente pedir para que os estudantes leiam suas próprias respostas ao “Refleta & Responda” da Parte 07 antes de iniciar a aula. A conversa inicial com o professor também servirá para que os alunos tentem comunicar, verbalmente, a forma como acreditam que a dispersão ocorre dentro da gota;
- O arco-íris secundário pode ser explicado de maneira mais simplificada. O docente deve cuidar apenas com que o fato de que o feixe colorido perde

intensidade na segunda reflexão interna e inverte suas cores seja bem compreendido pelos alunos;

- Ao final da aula, professor informa aos estudantes que no próximo encontro será realizado um questionário de verificação.

PLANO DE AULA	
<b>PARTE 09</b>	
<b>Disciplina</b>	FÍSICA
<b>Carga Horária</b>	1 hora/aula (50 min.)
<b>Assunto:</b>	
(Avaliação) Reflexão, refração, dispersão, formação do arco-íris primário e secundário.	
<b>Competências e Habilidades:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender enunciados que envolvam símbolos particulares do objeto de estudo;</li> <li>• Propor modelos explicativos e comunicá-los a partir do vocabulário cientificamente aceito;</li> <li>• Utilizar leis e teorias da física.</li> </ul>	
<b>Objetivo(s):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaborar sínteses escritas sobre a refração da luz e a formação do arco-íris;</li> <li>• Representar com ilustrações o comportamento de um raio de luz dentro de uma gota de chuva;</li> <li>• Determinar o índice de refração de um meio valendo-se da Lei de Snell-Descartes.</li> </ul>	
<b>Encaminhamentos da aula:</b>	
<p>Conforme combinado na aula anterior, o professor deve entregar o fascículo Parte 09 que contém cinco questões sobre todos os conteúdos estudados com a aplicação deste produto educacional. Os alunos devem realizar a avaliação individualmente e sem consulta e o papel do docente será restrito a controlar o silêncio do ambiente.</p> <p>As questões propostas estão relacionadas:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) à identificação dos fenômenos de reflexão e refração a partir de uma ilustração;</li> <li>2) à descrição de aspectos gerais do fenômeno da refração da luz;</li> <li>3) à ilustração de como a luz solar se comporta quando intercepta uma gota de chuva;</li> <li>4) à descrição do comportamento ilustrado na questão 3;</li> <li>5) ao cálculo do índice de refração de um meio através da lei de Snell-Descartes.</li> </ol> <p>Após o tempo de aula ser esgotado, a atividade deve ser recolhida e o período de aplicação do material estará oficialmente encerrado.</p>	
<b>Avaliação:</b>	
<p>O questionário proposto destaca em suas questões os principais tópicos estudados durante a aplicação do produto educacional. Observar se é correta a forma como o aluno se refere a cada fenômeno e os descreve é o principal parâmetro desta avaliação. O uso</p>	

das equações matemáticas que permeiam o estudo dos fenômenos ópticos também é um ponto de análise importante. Maiores detalhes sobre cada uma das questões serão expostos na seção “observação”.

#### Recursos didáticos:

Fascículo Parte 09, caneta, lápis, borracha e calculadora.

#### Bibliografia:

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física:** eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 406 p.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BRASIL, MEC, Base Nacional Comum Curricular – BNCC, versão aprovada pelo CNE, novembro de 2017. Disponível em:

<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/wpcontent/uploads/2018/02/bncc-20dez-site.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2020.

#### Observação:

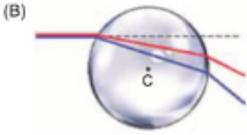
- Para que os alunos possam dedicar mais tempo para as questões conceituais, exibindo mais de seu vocabulário científico, recomenda-se que seja permitido o uso de calculadora para a realização desta atividade;
- Caso queira, é de livre escolha ao docente escrever a lei de Snell-Descartes na lousa;
- Os pontos listados abaixo permitem que o professor realize sua análise de cada uma das questões desta atividade.
  - 1) Após realizar os experimentos em etapas anteriores, esta questão é uma alusão à representação icônica de Bruner. A correlação da imagem com o nome do fenômeno não o define completamente, mas já é um passo importante a ser dado no objetivo de se dominar um conhecimento. Por mais que seja um problema muito simples, é comum que nos primeiros encontros os estudantes confundam reflexão e refração. Neste momento, isso já não pode ser mais recorrente;
  - 2) Por sua vez, esta questão já apresenta a necessidade de o aluno lançar mão de um sistema de símbolos para descrever o que ocorre no fenômeno da refração da luz. Ao respondê-la a contento, o estudante demonstra ter atingindo o último nível de representação de um conhecimento para Bruner, o simbólico;
  - 3) O problema trazido pela questão 3 exigirá que o estudante ative seus procedimentos de busca para resgatar de seu inconsciente a forma como o raio de luz se comporta ao incidir sobre a gota de chuva. Ao fazer a ilustração, o indivíduo transforma o seu conhecimento em real e exterior, que pode ser acessado por ele ou por terceiros no futuro. É isso o que apregea a teoria da Criação do Conhecimento Real Exterior, de Cruz;

- 4) Para responder à pergunta 4, o estudante terá de ativar seu procedimento de busca por meio de uma pergunta realizada por ele mesmo: o que está acontecendo com o raio de luz? Além disso, é mais uma oportunidade de o aluno mostrar seu Poder Efetivo, conectando assuntos que durante parte da aplicação do produto foram vistos de maneira dissociada;
- 5) Mais uma vez o estudante terá de usar a representação simbólica para resolver a questão. Ao efetuar o cálculo de maneira correta, o aluno demonstra domínio de mais este nível de representação.

<b>APÊNDICE</b>	<h1 style="margin: 0;">GABARITO</h1>
<h1 style="margin: 0;">III</h1>	

Segue o gabarito dos Exercícios de fixação encontrados nas Partes 05 e 08 deste material.

<b>PARTE 05</b>			
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
a) 68°	2,5	1,5	d) resina

<b>PARTE 08</b>			
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
c) Reflexão, refração e dispersão;	b) a componente vermelha desvia mais que a violeta;	d) atrás de você.	(B) 

APÊNDICE	<b>SLIDES</b>
<b>IV</b>	



Acesse os *slides* dispostos abaixo através do *QR Code* ao lado. Ou então utilize o link: <https://bitly.com/RkPqU>

## **CONHECENDO O ARCO-ÍRIS**

Transparências para acompanhamento das aulas

Gabriel Roberto Garcia Levinski (autor)  
Gerson Kniphoff da Cruz (orientador)

## **PARTE 01**

**PARTE 01****ATIVIDADE I**

**[IMAGEM 01]** O que você observa na imagem acima? Como você explicaria este fenômeno?



**[IMAGEM 02]** Descreva o que você observa na imagem acima.

3

**PARTE 01****ATIVIDADE I**

**[IMAGEM 03]** Descreva a imagem acima e explique como ocorre este fenômeno.

4

**PARTE 03**

5

**PARTE 03**

**MÃO NA MASSA!**



6

**PARTE 03**

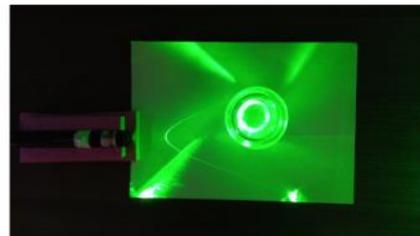
**MÃO NA MASSA!**



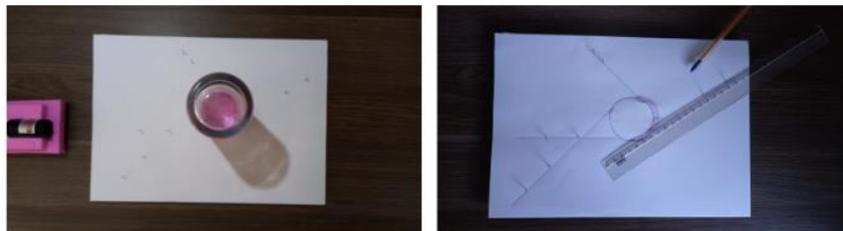
7

**PARTE 03**

**MÃO NA MASSA!**



8

**PARTE 03****MÃO NA MASSA!**

9

**PARTE 05**

10

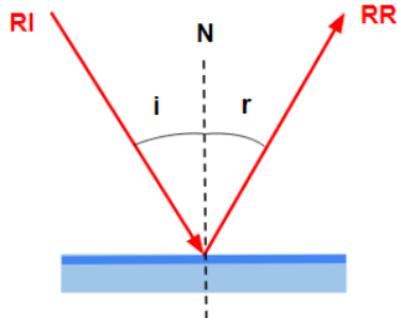
**PARTE 05****REFLEXÃO DA LUZ**

Disponível em:  
<https://maestroviviale.com/reflexao-da-luz-elementos-leis-e-aplicacoes/>

11

## PARTE 05

## LEIS DA REFLEXÃO



O raio incidente, o raio refletido e a reta normal são coplanares

O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais.

RI: Raio incidente | RR: Raio refletido | N: Normal | i: Ângulo de incidência | r: Ângulo de reflexão

12

## PARTE 05

## REFRAÇÃO DA LUZ



A **refração** é o fenômeno que ocorre quando a luz muda de meio e, por consequência, sua **velocidade de propagação se altera**

Disponível em: <https://conhecimentocientifico.com/refracao-da-luz/>

13

## PARTE 05

## ÍNDICE DE REFRAÇÃO

A velocidade da luz muda a depender do meio em que ela se propaga:

Meio	Velocidade da luz (m/s)
Ar	299.702.547
Água	225.407.863
Álcool etílico	220.435.631
Vidro	199.861.638
Diamante	123.881.180

O índice de refração  $n$  é definido como:

$$n = \frac{c}{v}$$

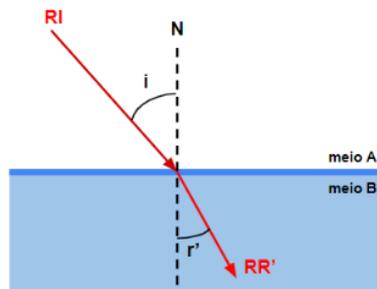
Onde:

$c$ : velocidade da luz no vácuo;  
 $v$ : velocidade da luz no meio estudado.

14

## PARTE 05

## LEIS DA REFRAÇÃO



O raio incidente, o raio refratado e a reta normal são coplanares

Os índices de refração dos meios A e B e os ângulos de incidência e refração se relacionam pela **Lei de Snell-Descartes**.

$$n_A \cdot \text{sen}(i) = n_B \cdot \text{sen}(r')$$

RI: Raio incidente | RR: Raio refratado | N: Normal | i: Ângulo de incidência | r': Ângulo de refração 15

# PARTE 07

16

## PARTE 07

## DISPERSÃO DA LUZ BRANCA



A cor branca é a composição ("soma") de todas as cores



O desvio sofrido pelos raios de luz é diferente para as cores do espectro visível.



O branco se decompõe nas cores do arco-íris.

Disponível em: <https://www.infoescola.com/optica/dispersao-da-luz/>

17

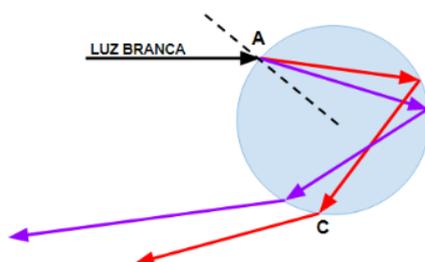
# PARTE 08

18

## PARTE 08

### FORMAÇÃO DO ARCO-ÍRIS

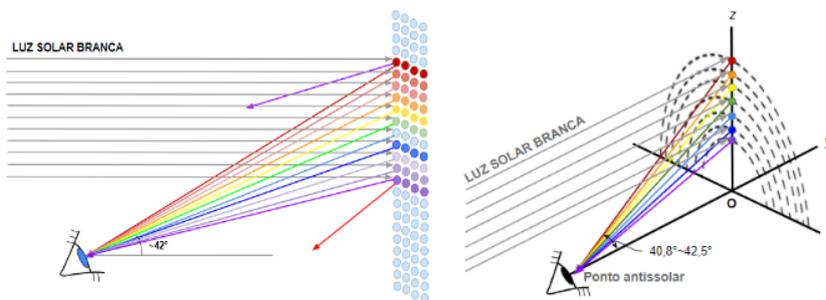
Quando a luz proveniente do Sol chega à gota de chuva, ocorre a dispersão da luz branca



19

## PARTE 08

### FORMAÇÃO DO ARCO-ÍRIS



O ângulo de visualização do arco-íris primário está no intervalo de  $40,8^\circ$  e  $42,5^\circ$ .

20

## PARTE 08

## ARCO-ÍRIS SECUNDÁRIO



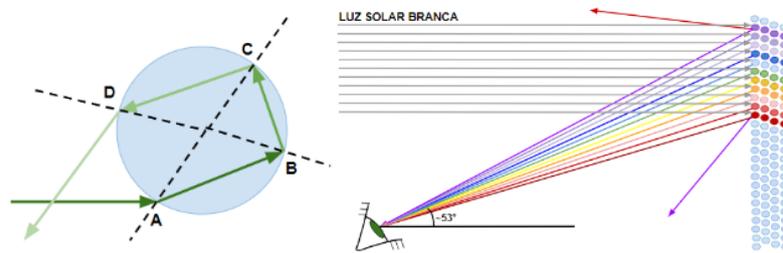
Disponível em:

<https://seara.ufc.br/pt/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/descrevendo-o-arco-iris/>

21

## PARTE 08

## ARCO-ÍRIS SECUNDÁRIO



O ângulo de visualização do arco-íris secundário está no intervalo de  $50,1^\circ$  e  $53,2^\circ$ .

22