

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

PEDRO SCHRAMM RIBEIRO

**PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS: UMA PROPOSTA
DIDÁTICO-PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO**

MEDIANEIRA

2021



PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS: UMA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO

Principles and Applications of Optical Tweezers: A Didactic-Pedagogical Proposal to High School

Pedro Schramm Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo V. B. Lukasiewicz

MEDIANEIRA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira



PEDRO SCHRAMM RIBEIRO

**PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS: UMA PROPOSTA DIDÁTICO-
PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ensino De Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física Na Educação Básica.

Data de aprovação: 30 de Agosto de 2021

Prof Gustavo Vinicius Bassi Lukasiewicz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcos Paulo Belancon, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Nelson Guilherme Castelli Astrath, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Prof Reginaldo Aparecido Zara, Doutorado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/09/2021.

Dedico este trabalho primeiramente a meus pais,
Cláudia e Ubirajara, pela valorização dos meus
estudos desde sempre, além do apoio incondicional
em todas as formas.

Dedico também este trabalho à minha esposa
Cecília, que desde que passou a fazer parte da minha
vida, me inspirou a ser cada vez melhor, além de me
dar, à sua maneira carinhosa, força e coragem nos
momento difíceis.

Com muita alegria, dedico também este trabalho ao
meu orientador Gustavo, cujas palavras e apoio
foram imprescindíveis para me manter são,
motivado e empolgado com este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha esposa Cecília, pelo apoio emocional e o amor incondicional, apesar das viagens e momentos de ausência. Obrigado por me proporcionar força e coragem para suportar os momentos mais penosos e difíceis desta caminhada.

Aos meus pais, Cláudia e Ubirajara, que nunca mediram esforços para que eu pudesse ter a melhor educação. O amor e os valores de nossa família me permitiram chegar até aqui. Obrigado pelo apoio, não só nesta etapa, mas ao longo de toda a minha vida.

Aos meus irmãos Lucas, Gabriel e Gabriella. Às suas próprias maneiras, me inspiram a querer ser cada vez melhor.

Ao meu professor orientador Gustavo Lukasiewicz, que esteve sempre presente e nunca mediu esforços para me auxiliar em todos os pontos deste trabalho, dos conceitos físicos à escrita e às imagens. Cada diálogo que tivemos me serviu de inspiração acadêmica e profissional.

Aos professores Jaziel Goulart e Fabrício Dalmolin, pela motivação e pelas conversas extraclasse, que elevaram meu interesse e paixão pela ciência e pelo mundo acadêmico.

À professora Shiderlene Vieira, pela dedicação às aulas sobre teorias de aprendizagem e por todas as ideias e contribuições teóricas presentes neste trabalho.

A todos os professores do mestrado, por contribuírem direta ou indiretamente para este trabalho.

Ao meu amigo e colega de mestrado Patrick, pela parceria e companheirismo ao longo de toda esta caminhada. Nossos trabalhos juntos e nossas conversas empolgadas fizeram grande diferença.

Aos demais colegas do mestrado, pelas conversas e risadas. Sem dúvida contribuíram para que esta etapa de minha vida tenha se tornado mais leve.

Ao meu amigo Thiago, por toda a motivação e ajuda na parte escrita. Sem suas ideias e sugestões este trabalho teria, sem dúvidas, se tornado mais difícil.

Ao meu amigo Maximiliano, pelas contribuições em toda a pesquisa e escritas na língua inglesa.

Aos coordenadores dos colégios em que trabalho, Martin, Paulo e Arno, pela compreensão em meus momentos de ausência em virtude do mestrado, pelo apoio e pela concessão dos horários do contraturno para a aplicação do produto educacional.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Polo Medianeira, à Sociedade Brasileira de Física (SBF) e ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) pela contribuição na minha formação enquanto professor de Física.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Ensinando, aprende-se.”
(Sêneca)

RESUMO

RIBEIRO, Pedro Schramm. **Princípios e aplicações das pinças ópticas: uma proposta didático-pedagógica para o ensino médio**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2021.

A capacidade do cidadão em participar conscientemente do mundo criado pelo homem moderno e a possibilidade de alterar a realidade em que está inserido tem dependência direta da compreensão desta mesma realidade. Consequentemente, o ensino de Física deve ser constantemente atualizado, de forma a não criar um abismo entre o que o estudante vê em sala de aula e o que ele vivencia em seu cotidiano. Assim, abordar tópicos de Física Moderna e Contemporânea torna-se essencial, pois cria a proximidade dos estudantes com a realidade do mundo contemporâneo. Neste contexto, foi desenvolvida uma proposta didático-pedagógica que aborda o princípio de funcionamento das pinças ópticas, tecnologia que utiliza laser para manipular pequenos objetos e rendeu o prêmio Nobel de 2018 a Arthur Ashkin. A proposta envolve a utilização de material didático, construído em formato de sequência de aulas conceitualmente coerentes com a teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. O objetivo do material é apresentar os fenômenos físicos envolvidos no aprisionamento óptico, utilizando conceitos de física aprendidos no Ensino Médio. Assim, apresenta-se em dois modelos: o Material do Aluno, que contém linhas e espaços para anotações; e o Manual do Professor, que contém as respostas das perguntas presentes no texto, além de sugestões para a aplicação, como vídeos e sites que podem ser utilizados. A aplicação da proposta foi feita de forma remota e síncrona para duas turmas da terceira série do Ensino Médio de dois colégios diferentes. Para verificar a aprendizagem dos alunos foram realizadas duas atividades: a elaboração de um texto explicativo com a possibilidade do uso de diagramas e figuras desenhados à mão e a construção de um mapa conceitual. A partir de uma análise qualitativa, verificou-se indícios de uma aprendizagem significativa para grande parte dos alunos nas duas atividades.

Palavras-chave: Aprendizagem Significativa. Aprisionamento Óptico. Ensino de Física.

ABSTRACT

RIBEIRO, Pedro Schramm. **Principles and applications of Optical Tweezers: a didactic-pedagogical proposal to high school**. 2021. Master's Dissertation in Physics Teaching. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2021.

The capability of citizens to consciously participate in the world created by modern man and the possibility of changing the reality in which they are inserted is directly dependent on the understanding of this reality. Consequently, the teaching of Physics must be constantly updated so not to create an abyss between what students learn in classroom and what they experience in their daily lives. Thus, approaching topics of Modern and Contemporary Physics becomes essential, because it creates a proximity between students and the reality of the contemporary world. In this context, it was developed a didactical-pedagogical proposal that approaches the working principle of optical tweezers, a technology that uses laser to manipulate small objects and gave the Nobel Prize to Arthur Ashkin in 2018. The proposal involves the use of a didactic material, made in a format of a didactical sequence of classes, coherent with David Ausubel's theory of Meaningful Learning. The purpose of the material is to present the physical phenomena involved in optical trapping using physical concepts learned in high school. Thus, it is presented in two models: the Student's Material, which contains lines and spaces for annotations; and the Teacher's Manual, which contains the answers for the questions in the text and suggestions for its application, like videos and websites that can be used. The proposal was applied remotely and synchronously to two student groups of the third grade of high school from two different schools. To verify the students' learning, two activities were performed: the elaboration of an explanatory text with the possibility of using hand-drawn figures and diagrams, and the construction of a concept map. From a qualitative analysis, signs of a meaningful learning were verified in most students in both activities.

Keywords: Meaningful Learning. Optical Trapping. Physics Teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Colisão entre as esferas 1 e 2; (b) força de contato na esfera 1; (c) força de contato na esfera 2.	24
Figura 2 - Colisão oblíqua.	25
Figura 3 - Composição vetorial de movimentos em um elevador.	27
Figura 4 - Vetor v e suas componentes ortogonais.	28
Figura 5 - Componentes da força F na direção dos eixos auxiliares R e S	28
Figura 6 - Representação dos raios de luz.	29
Figura 7 - Raio de luz incidindo obliquamente na interface ar-vidro.	30
Figura 8 - Refração para $n_B > n_A$	31
Figura 9 - Cometas ao redor do Sol com suas caudas sob influência da pressão de radiação.	32
Figura 10 - Radiômetro de Crookes.	35
Figura 11 – Intensidade relativa I/I_0 de um feixe laser com perfil gaussiano em função da posição radial r	37
Figura 12 - Refração de um raio de luz em uma esfera de material transparente.	38
Figura 13 - Esquema de forças na esfera em razão dos raios refratados.	39
Figura 14 - Componentes da força óptica.	39
Figura 15 - Armadilha óptica constituída por dois feixes laser.	41
Figura 16 - Partícula levitando sob ação exclusiva da pressão de radiação.	41
Figura 17 - Modelo de pinças ópticas utilizando um único feixe focalizado.	42
Figura 18 - Esferas de poliestireno e sílica formando configurações simétricas com o auxílio de uma única pinça óptica.	47
Figura 19 - Simulador de pinças ópticas e aplicações.	48
Figura 20 - Interação entre um laser e uma gota de tinta.	57
Figura 21 - Microesferas de um micrômetro de diâmetro sendo manipuladas por uma pinça óptica.	58
Figura 22 - Resposta à questão 1 (a).	65
Figura 23 – Resposta à questão 1 (b).	65
Figura 24 – Resposta à atividade 2 (a).	67
Figura 25 - Resposta à atividade 2 (b).	68
Figura 26 - Resposta à atividade 2 (c).	69
Figura 27 - Resposta à atividade 2 (d).	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM FÍSICA.....	21
3.1 AS LEIS DE NEWTON	21
3.2 VETORES E OPERAÇÕES VETORIAIS	26
3.3 ÓPTICA GEOMÉTRICA	29
3.4 PRESSÃO DE RADIAÇÃO	31
3.5 PINÇAS ÓPTICAS	36
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
4.1 ESTRUTURA DA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA.....	45
4.1.1 Apresentação das pinças ópticas e prática investigativa utilizando simulador	46
4.1.3 Revisão de conceitos em Mecânica e Óptica.....	49
4.1.4 O princípio de funcionamento das pinças ópticas	51
4.1.5 Avaliação da aprendizagem.....	53
4.2 APLICAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 O PRIMEIRO CONTATO COM PINÇAS ÓPTICAS	56
5.2 TESTE DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS	58
5.3 REVISÃO DOS CONCEITOS DE MECÂNICA, ÓPTICA E FÍSICA MODERNA	60
5.4 O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS PINÇAS ÓPTICAS.....	60
5.5 A AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM	62
5.5.1 Comentário às respostas da questão 1	63
5.5.2 Comentários às respostas da questão 2.....	66
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A – Produto Educacional	75

1 INTRODUÇÃO

A sociedade se beneficia diariamente com o avanço tecnológico promovido pela Ciência. No entanto, poucas pessoas conseguem entender os princípios físicos por trás do funcionamento das tecnologias que têm facilitado e melhorado suas vidas. Mesmo adolescentes em idade escolar, com sua facilidade para aprender como utilizar novas tecnologias, não compreendem como foram fabricadas ou a partir de quais ideias elas surgiram. Há diversas razões para isso, dentre elas o grande abismo existente entre a maior parte da Ciência ensinada em sala de aula e a Ciência do mundo contemporâneo. No campo da Física, por exemplo, nota-se uma grande deficiência na quantidade de aulas relacionadas a tópicos de Física Moderna e Contemporânea. Esta área explica como funcionam os sistemas GPS, a tecnologia LED, o LASER, as placas solares, os componentes de computadores e as câmeras digitais, para citar alguns exemplos do cotidiano.

À medida que novas descobertas científicas são feitas e tecnologias são desenvolvidas, maior é a importância dos conhecimentos em Física Moderna e Contemporânea. Entretanto, o currículo escolar não se modifica na mesma velocidade e, conforme o tempo passa, maior se torna a distância entre a realidade dos alunos e o conteúdo visto em sala de aula. Como ressalta Moreira (2014), apesar de estarmos no século XXI, os conceitos ensinados em sala, em sua esmagadora maioria, datam de antes do século XX. Como consequência, alguns alunos sentem-se desmotivados e acabam, por muitas vezes, enxergar a Física como números e fórmulas que precisam ser memorizados.

Em seu artigo, Pena (2006) apresenta várias razões para que professores do Ensino Médio insiram tópicos de Física Moderna e Contemporânea em suas aulas. A motivação deste trabalho tem como base muitas destas razões. Dentre elas, destacam-se duas: (i) a participação consciente do cidadão neste mundo criado pelo homem atual e a possibilidade de alterar a realidade em que vive está diretamente relacionada com sua capacidade de compreensão desta mesma realidade; (ii) conhecer os princípios físicos da tecnologia atual podem influenciar e ajudar na escolha de uma carreira profissional, além de criar uma conexão entre a física de sala de aula e física do cotidiano.

É importante ressaltar que o autor deste trabalho não tem intenção de mostrar demérito no ensino da Física Clássica. Seus conceitos têm suma importância para a compreensão dos fenômenos da natureza e descrição satisfatória do mundo macroscópico. Ademais, este trabalho unifica os conceitos de Física Clássica ensinados no Ensino Médio com tópicos de Física Moderna e Contemporânea para atingir seus objetivos. O produto educacional desenvolvido

busca mostrar ao aluno que o conhecimento em Física obtido no ensino médio possibilita a compreensão de muitas das novas tecnologias e descobertas científicas, situando-o no mundo contemporâneo.

Este trabalho envolveu a criação de um material didático em forma de Manual do Professor e Material do Aluno, composto por uma sequência de aulas, roteiro para uso de simulador, sugestões de vídeos, sites e imagens. Com visão na aplicação, o produto educacional foi desenvolvido para que o professor possa conduzir sua aula com segurança. O Manual do Professor contém as respostas de todas as questões e reflexões que aparecem ao longo do texto, além de uma quantidade maior de sugestões de vídeos e propostas para a aula. Além disso, a paginação e o texto teórico são idênticos ao do Material do Aluno, facilitando as referências durante as aulas. A linguagem utilizada é simples, com foco no aluno, e objetivo de resgatar seu espírito investigativo, a vontade de aprender sobre o mundo e o momento em que vive, redescobrir a física enquanto ciência que busca explicar os fenômenos da natureza, visíveis e invisíveis, e permite desenvolver tecnologias cada vez mais sofisticadas.

O tema escolhido foi o princípio de funcionamento das pinças ópticas, tecnologia desenvolvida pelo cientista americano Arthur Ashkin e que lhe proporcionou o Prêmio Nobel de Física de 2018. Como o próprio nome sugere, pinças ópticas são ferramentas que usam luz para aprisionar pequenos objetos ou microorganismos de forma remota, estéril e precisa. As aplicações biológicas desta tecnologia vão desde manipular e medir propriedades mecânicas do DNA, como resistência mecânica e elasticidade, até a caracterização de motores biológicos moleculares, responsáveis por uma variedade de processos vitais, como contração muscular, divisão celular, transporte de organelas dentro das células, entre outros (NEVES, 2006).

Os fenômenos e princípios físicos envolvidos no pinçamento ópticos têm sido estudados até hoje e rendem diversos trabalhos acadêmicos que tratam de aplicações e teorias sofisticadas. No entanto, é possível compreender os princípios de funcionamento das pinças ópticas, dentro de alguns limites, apenas com os conceitos de física básica ensinados em nível de Ensino Médio atualmente. Isso permite ao aluno uma motivação adicional em relação a estes conceitos, uma vez que eles serão vistos de forma integrada e aplicada.

A realidade do autor deste trabalho, assim como de muitos professores de escolas da rede particular de ensino, é voltada para a preparação de alunos para os concursos vestibulares, porta de entrada para diversas universidades do país. A extensa quantidade de conteúdo cobrada nestas provas acaba mobilizando o foco do aluno para a memorização de fórmulas matemáticas e exercícios repetitivos com resolução mecânica. Neste sentido, é preciso tomar cuidado com a forma de ensinar física, pois este tipo de abordagem se distancia da realidade do aluno,

prejudicando o aprendizado pela falta de contextualização. Não obstante, há muito tempo decorar fórmulas deixou de ser a melhor maneira de realizar provas de vestibular, a tomar como exemplo o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), cujas questões são contextualizadas e exigem alto grau de interpretação.

Assim, o objetivo deste trabalho se mostra amplo, encaminhando-se no sentido de instigar a curiosidade do aluno acerca da aplicação dos conceitos vistos em sala ao desenvolvimento tecnológico, ao mesmo tempo em que mantém o foco no aprendizado de Física. Desta forma, busca-se estimular uma proximidade maior do aluno com a ciência do mundo contemporâneo, sem deixar de lado a preparação para a prova do vestibular, uma vez que para compreender o princípio de funcionamento de pinças ópticas os alunos utilizarão seus conhecimentos de Mecânica e Óptica.

O Brasil não possui, na base curricular do Ensino Médio, um conteúdo específico para o estudo de pinças ópticas. Para entendê-las, no entanto, o aluno precisa correlacionar várias áreas do conhecimento, até então desconectadas, melhorando seu nível de abstração. Nota-se, neste ponto, uma concordância com os objetivos da área de Ciências da Natureza no Ensino Médio, segundo a Base Nacional Comum Curricular – BNCC:

“No Ensino Fundamental, os estudantes têm a oportunidade de enfrentar questões que demandam a aplicação dos conhecimentos sobre **Matéria e Energia** em uma perspectiva fenomenológica, com o objetivo de introduzir a prática da investigação científica e ressaltar a importância dessa temática na análise do mundo contemporâneo. No Ensino Médio, espera-se uma diversificação de situações-problema, incluindo aquelas que permitam aos jovens a aplicação de modelos com maior nível de abstração e de propostas de intervenção em contextos mais amplos e complexos.” (BRASIL, 2018, p.538)

O aprisionamento óptico descoberto por Arthur Ashkin pode ser explicado com conceitos físicos simples e fenômenos naturais abordados nas aulas de Física do Ensino Médio, como a conservação da quantidade de movimento, a refração da luz e a pressão de radiação (ASHKIN, 1970). Ao longo das aulas, o aluno conhece o contexto histórico no qual a tecnologia se desenvolveu e revisa os conceitos físicos necessários à sua compreensão, contribuindo para o seu aprendizado na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Segundo a BNCC, esta é uma das propostas do Ensino Médio: “[...] focalizar a interpretação de fenômenos naturais e processos tecnológicos de modo a possibilitar aos estudantes a apropriação de conceitos, procedimentos e teorias dos diversos campos das Ciências da Natureza.” (BRASIL, 2018, p.537).

Para cada área do conhecimento, a BNCC propõe competências específicas que devem ser desenvolvidas pelos alunos ao longo do Ensino Médio, bem como habilidades a serem

alcançadas nesta etapa. Quanto a isso, o ensino de pinças ópticas converge com a competência específica 3, que diz:

“Analisar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).” (BRASIL, 2018, p.539)

Dentre as teorias de aprendizagem, optou-se por seguir a linha cognitivista de David Paul Ausubel, que elaborou a chamada teoria da aprendizagem significativa. A escolha se deu pela estrutura do produto educacional e da sequência de aulas propostas. Segundo a teoria, o principal fator isolado de aprendizagem é o que o aluno já sabe, isto é, seus conhecimentos prévios (MOREIRA, 1999, p.152). Assim, as aulas foram preparadas para guiar o professor em uma sequência de conteúdos correlacionados e sequenciais. Desta maneira, o aluno pode construir o conhecimento de forma não-arbitrária e não-literal, criando as conexões necessárias e permitindo que as novas informações relacionem-se com seu conhecimento construído previamente.

Devido à pandemia da Covid-19 no ano de 2020, o produto educacional foi aplicado de forma remota e síncrona. Além disso, a necessidade de cumprir o conteúdo programático neste ano atípico, impediu a aplicação do produto em horário de aula, sendo, portanto, aplicado no contraturno.

O capítulo 2 trata especificamente sobre aspectos relevantes da teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. O capítulo 3 traz a fundamentação teórica em Física sobre os conceitos necessários para a compreensão dos fenômenos envolvidos no funcionamento das pinças ópticas. O capítulo 4 apresenta a metodologia para a aplicação do produto educacional, mostrando a relação de cada aula com a teoria da aprendizagem significativa. No capítulo 5 relatam-se os resultados e as experiências obtidas durante e após a aplicação do produto educacional de forma remota. Por fim, o capítulo 6 apresenta uma discussão geral acerca da aplicação do produto e sobre as maiores dificuldades observadas na compreensão dos alunos, além de algumas ideias e perspectivas para aplicações futuras.

2 TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Para aprender sobre a tecnologia das pinças ópticas é necessário que o aluno tenha conhecimento de alguns conceitos fundamentais da física como mecânica e óptica. Por este motivo, a linha teórica de aprendizagem cognitivista, que leva em conta os mecanismos internos para a estruturação do pensamento e do conhecimento na mente humana, foi escolhida como base para a elaboração de uma proposta didático-pedagógica que tem como objetivo o ensino dessa tecnologia. Mais especificamente, a metodologia desta proposta se baseia na teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel e envolve a produção de um material didático potencialmente significativo.

A teoria da aprendizagem significativa é um modelo teórico de aprendizagem da linha cognitivista, criado por David P. Ausubel (1918–2008), que tem como base a ideia de que o fator de maior relevância para a aprendizagem de um indivíduo é aquilo que ele já sabe. Principalmente focada no ambiente escolar, a teoria de Ausubel estende-se a qualquer área de conhecimento, das humanas às exatas, sempre levando em conta que a aprendizagem significativa só poderá ocorrer por meio da interação entre a nova informação e os aspectos específicos e relevantes da estrutura cognitiva do indivíduo que aprende (MOREIRA, 2009).

Segundo a teoria, cada pessoa possui uma estrutura cognitiva proveniente de suas descobertas e aprendizados obtidos ao longo da vida. Uma definição mais precisa é feita por Moreira (1999, p.152): “[...] a estrutura cognitiva, entendida como o conteúdo total de ideias de um certo indivíduo e sua organização; ou o conteúdo e organização de suas ideias em uma área particular do conhecimento.” O mesmo autor afirma que há, nessa estrutura, o que Ausubel chamou de *subsunçores*, que servem como ancoradouros às novas informações. Dessa forma, a ausência destes elementos impede que o indivíduo que aprende dê significados àquelas informações. O indivíduo irá recebê-las, mas poderá, no máximo, armazená-las de maneira arbitrária, desconectadas de subsunçores específicos.

No contexto escolar, cada área particular do conhecimento tem suas ideias e significados organizados dentro da estrutura cognitiva do aluno. Entretanto, deve-se entender que esta não é estática, mas um conjunto hierárquico de subsunçores dinamicamente inter-relacionados. Isso significa que a estrutura cognitiva não acumula simplesmente informação em cima de informação. Conforme o sujeito realiza as interações dos novos conhecimentos com seus subsunçores, a estrutura cognitiva vai mudando e se reorganizando (MOREIRA, 2009).

Os subsunçores podem ser associados a qualquer tipo de conhecimento prévio especificamente relevante, não necessariamente conceitual. Moreira (2012b) chama a atenção

para o termo *conceito subsunçor*, muito utilizado pelo próprio Ausubel, mas que é, de certa forma, impreciso pois diminui a abrangência do significado de subsunçor, isto é, este não é necessariamente um conceito bem formado na estrutura cognitiva, mas qualquer tipo de conhecimento prévio especificamente relevante. Um aluno pode, por exemplo, ter o conhecimento do contexto e o significado por trás de uma obra de arte, sem necessariamente entender os conceitos que envolvem a vertente artística daquela obra, seja surrealismo, cubismo, renascentismo ou outro. Da mesma maneira, um aluno pode ter conhecimento sobre fenômenos físicos que ocorrem no dia a dia, e ainda assim não saber os conceitos e leis fundamentais envolvidos.

Aos olhos de alguns teóricos educacionais contemporâneos, pode parecer estranho apresentar uma proposta didático pedagógica que tem como ponto central um material didático e aulas expositivas. Isto porque, em geral, espera-se que novas técnicas e estilos de aula sejam apresentados, com modelos diferentes do chamado tradicional. Entretanto, é perfeitamente aceitável dentro da ideia de aprendizagem significativa. Utilizar aulas expositivas, por exemplo, não significa manter-se estático. É possível melhorar a forma como a informação é passada utilizando o que há de novo, como vídeos, figuras animadas, simuladores e questionários interativos. Em seu livro, Ausubel comenta:

[...] poucos mecanismos pedagógicos dos nossos dias têm sido tão inequivocamente repudiados pelos teóricos educacionais como o método de instrução verbal expositiva. [...] Ao longo das últimas cinco décadas, introduziram-se em larga escala programas de atividades, métodos de projetos, várias formas de se maximizar a experiência não verbal na sala de aula [...]. Bastante aquém de qualquer seja o seu valor intrínseco, estas actividades surgiram sobretudo devido às inadequações gerais da instrução verbal, tal como praticada nas escolas. (AUSUBEL, 2000, p.6)

Nota-se, portanto, que o problema não é a técnica utilizada ou o modelo em si, mas sim a forma como é utilizado pelo professor. As inadequações comentadas pelo autor envolvem, entre outras práticas, o uso de termos técnicos específicos jamais ouvidos pelos alunos e a apresentação desorganizada de fatos e conceitos que não necessariamente estão relacionados entre si. Nesse sentido, o professor que utiliza a proposta didático-pedagógica descrita neste trabalho deve estar ciente de todas estas inadequações, pois caso contrário o aluno incorporará as informações recebidas à sua estrutura cognitiva de forma arbitrária, com pouca ou nenhuma interação com os subsunçores específicos, resultando no que Ausubel chamava de aprendizagem mecânica (MOREIRA, 1999).

A diferença básica entre a aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa está na aquisição de significados. Se a informação recebida a partir de uma aula ou de um material relaciona-se com a estrutura cognitiva do sujeito de forma literal e arbitrária, a atribuição de

significados é prejudicada, uma vez que não há ancoragem em nenhum conhecimento prévio especificamente relevante. A aprendizagem nesse caso é mecânica, a partir de simples memorização. Entretanto, se a informação recebida relaciona-se com a estrutura cognitiva de forma não-litera e não-arbitrária, conectando-se com os subsunçores do indivíduo, a atribuição de significados é facilitada e a aprendizagem torna-se significativa (MOREIRA, 1997).

É necessário esclarecer que embora a aprendizagem significativa seja sempre a melhor opção em detrimento da aprendizagem mecânica, esta não é totalmente desprovida de processos cognitivos e pode, em alguns casos, ser até benéfica (MOREIRA, 2012b). Em uma sala de aula com alunos de diferentes níveis, por exemplo, é praticamente impossível para um professor montar sua aula de forma a contemplar os conhecimentos prévios de todos os alunos. Uns provavelmente terão mais facilidade que outros para dar significado às informações recebidas na aula. Entretanto, mesmo os alunos que não possuem o conhecimento prévio necessário para a compreensão daquela aula poderão aproveitar algo dela. No caso da Física, as novas palavras, equações, imagens e representações podem dar a base para iniciar uma nova área de conhecimento dentro de sua estrutura cognitiva.

Cada aluno possui características próprias de aprendizado, de modo que variar as técnicas utilizadas pode melhorar a eficiência do processo. Por exemplo, em uma aula expositiva o que deve ser aprendido é apresentado ao aluno em sua forma final, de forma que o aluno passa por um processo de aprendizagem por recepção. Por outro lado, a utilização de simuladores dá oportunidade ao aluno para descobrir o conteúdo principal, e assim, obter uma aprendizagem por descoberta. É importante salientar que esta diferenciação não implica em dizer que a aprendizagem por recepção é mecânica e a aprendizagem por descoberta é significativa, apenas que a abordagem é diferente (MOREIRA, 1999). Pode-se, como é possível perceber, utilizar ambas as estratégias em uma única aula, aumentando o engajamento dos alunos.

Ausubel deixa claro que a aprendizagem mecânica, embora contrastante, não é dicotômica em relação à aprendizagem significativa, mas sua diferenciação se dá em um *continuum*. Na prática, isso significa que a maioria do aprendizado não é puramente significativo ou mecânico, mas está em uma região entre os dois. Moreira (2012b), em uma provável referência à dicotomia do “preto e branco”, diz que o aprendizado geralmente se localiza em uma zona cinza, e um ensino potencialmente significativo pode auxiliar o aprendiz a caminhar nessa região e, no melhor dos casos, em direção à aprendizagem significativa.

Há um motivo para a palavra “potencialmente” sempre preceder as palavras “ensino”, “aula” e “material”. A verdade é que não é correto afirmar que uma aula ou um material é

simplesmente significativo, já que o significado será dado pelo aluno, com base em seus conhecimentos prévios. Um material potencialmente significativo é aquele que permite, ou facilita, a interação entre o conteúdo e os subsunçores do aluno, de forma não-arbitrária e não-literal. Isso significa que não basta que o material seja suficientemente claro e organizado em si, mas também que o aluno tenha uma estrutura cognitiva preparada para dar significado às informações (MOREIRA, 1999).

Neste ponto, se faz necessário entender que há, essencialmente, duas condições para uma aprendizagem significativa: o material deve ser potencialmente significativo e o aluno deve apresentar uma predisposição para aprender. A primeira condição foi explicada no parágrafo anterior, mas a segunda leva duas interpretações. Para Novak, coautor da segunda edição do livro da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, a predisposição do aluno está relacionada à experiência afetiva que ele tem no evento educativo (MOREIRA, 1997). Entretanto, uma segunda interpretação é dada por Ausubel em Moreira (1999, p.156): “Independentemente de quão potencialmente significativo seja o material a ser aprendido, se a intenção do aprendiz for simplesmente a de memorizá-lo, arbitrária e literalmente, tanto o processo de aprendizagem como seu produto serão mecânicos”. O material didático montado pelo autor deste trabalho está mais coerente com a segunda interpretação do que com a primeira.

Segundo Moreira (2014), se Ausubel pudesse reduzir toda psicologia educacional envolvida na teoria da aprendizagem significativa a um único princípio, seria para dizer que o fator isolado de maior influência na aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe. O professor deve averiguar isso e ensiná-lo de acordo. Uma forma de fazê-lo é utilizar um teste de conhecimentos prévios. O professor entrega uma espécie de avaliação para o aluno, com temas relevantes ao aprendizado do conteúdo principal, com o objetivo de descobrir o ponto de partida e qual deverá ser o formato da abordagem que será feita para o ensino do conteúdo. Ademais, as respostas obtidas com este teste podem ser comparadas às respostas obtidas na avaliação final, buscando assim verificar se houve aprendizado. É possível que, em algumas ocasiões, o teste de conhecimentos prévios revele uma grande defasagem entre o que se conhece e o que se pretende aprender. Sendo assim, insistir em ensinar o novo conteúdo, poderá culminar em aprendizagem mecânica.

Se for notada a ausência de subsunçores necessários à aula sobre pinças ópticas, o professor poderá utilizar um artifício chamado por Ausubel de organizador prévio. Segundo Moreira (2012b, p.11): “organizadores prévios podem ser usados para suprir a deficiência de subsunçores ou para mostrar a relacionalidade e a discriminabilidade entre novos conhecimentos e conhecimentos já existentes, ou seja, subsunçores.” Há divergência quanto à

eficácia desses organizadores, mas ainda assim, é uma alternativa para o caso crítico de quando o aluno não possui nenhum conhecimento prévio. Assim, antes de passar o conteúdo principal, o professor pode montar uma aula utilizando vídeos, exemplos práticos, situações-problema, reflexões e leituras que permitam ao aluno construir uma base mínima antes de engajar no conteúdo principal. O tempo para aplicação desta estratégia deve ser muito bem planejado, tornando-se um verdadeiro desafio, uma vez que a quantidade de aulas por semana é limitada.

Tendo em vista o caráter hierárquico da estrutura cognitiva de cada indivíduo, é interessante salientar que uma aula potencialmente significativa deve obedecer, a partir da exposição dos conceitos, o princípio da diferenciação progressiva. Segundo Ausubel (2000, p.6): “a maioria da aprendizagem e toda a retenção e a organização das matérias é hierárquica por natureza, procedendo de cima para baixo em termos de abstração, generalidade e inclusão.” Nesse sentido, o professor deve deixar claro as diferenças entre cada conceito novo e cada conceito pré-existente na mente do aluno. Caso contrário, uma confusão pode ser gerada, de forma que o aluno acabe por misturar conceitos não relacionados.

Isso traz um ponto importante: ter conhecimentos prévios nem sempre facilita a aprendizagem. Em alguns casos, pode até dificultar. Principalmente no campo da Física, no qual existem diversos mitos que precisam ser quebrados e nem sempre é uma tarefa muito fácil (MOREIRA, 2012b). Por exemplo, uma pessoa que acreditou a vida toda que os espelhos atraem raios, dificilmente se livra desta crença rapidamente. Um outro exemplo, é a ideia de pensar que objetos mais pesados caem mais rapidamente que outros. Embora isso seja observado cotidianamente, sabe-se que o atraso na queda de objetos leves, como uma pena, em relação a objetos pesados, como uma bola de boliche, se deve à influência da resistência do ar, que é desprezada em várias situações na Física ensinado no Ensino Médio.

Uma vez que o aluno compreende a diferença entre cada conceito, o princípio da reconciliação integradora entra em ação. Antes da definição, um breve esclarecimento: embora tenham sido tratados aqui como processos separados e sequenciais, a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora na realidade ocorrem simultaneamente (AUSUBEL, 2000). Trata-se da ideia de integrar os conceitos diferenciados de forma a conseguir encontrar semelhanças, mas sem misturá-los. Por este motivo, é possível entender como o ensino de pinças ópticas remete a este processo de forma literal, uma vez que integra os conceitos de mecânica e óptica na Física, que são naturalmente ensinados em áreas completamente diferentes.

Ao final de cada tema ensinado, há sempre a necessidade de uma avaliação para verificar se há evidências de uma aprendizagem significativa. Moreira (1999) chama a atenção sobre o cuidado que se deve ter com o tipo de avaliação. Perguntar ao aluno simplesmente algum

conceito ou elemento principal do que foi apresentado, dá margem para respostas mecanicamente memorizadas. O aluno deve demonstrar que possui significados claros e diferenciados do conceito. Assim, deve ser capaz de responder questões e problemas não familiares, ou seja, em um contexto diferente do que foi apresentado.

Um exemplo de atividade avaliativa, muito utilizada atualmente, é a construção de um mapa conceitual. Segundo Moreira (2012a), o mapa conceitual é uma forma de avaliação não tradicional, sendo mais apropriada para uma avaliação qualitativa da aprendizagem. Com ele é possível verificar a capacidade do aluno em organizar os significados e as ideias que ele atribuiu ao novo conhecimento. Cabe salientar que, uma vez que a aprendizagem significativa tem como base a atribuição de significados e que estes são individuais a cada aluno, não existe um mapa conceitual “correto”, no sentido de que cada aluno irá construir suas relações de acordo com seu próprio entendimento. Estas relações podem ser mais ricas ou mais pobres, mais concisas ou mais extensas, dependendo do aluno. O que o professor precisa avaliar é se as relações apresentadas evidenciam um domínio, ou melhor, um aprendizado significativo do conteúdo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM FÍSICA

O princípio de funcionamento de uma pinça óptica não é um tema comumente abordado em aulas de Física para turmas do Ensino Médio, tampouco em cursos de graduação. Entretanto, sua compreensão se mostra muito valiosa, uma vez que envolve uma série de conceitos relevantes dentro da Física. Ademais, a construção de uma linha de raciocínio que une os campos da Mecânica e da Óptica mostra aos alunos a abrangência de cada área estudada.

Neste capítulo são abordados os temas necessários à compreensão do fenômeno de pinçamento óptico, bem como o histórico do desenvolvimento dessa tecnologia e algumas aplicações atuais. A sequência de temas não foi escolhida ao acaso, de forma que há uma conexão entre cada conceito e o próximo. Sob esta perspectiva, são apresentados os conceitos de força, momento linear, refração, reflexão, pressão de radiação para, por fim, desenvolver o tema referente às pinças ópticas.

3.1 AS LEIS DE NEWTON

Em seu famoso livro *Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, o matemático e físico Sir Isaac Newton (1643 – 1727) enunciou as leis do movimento que utilizamos até hoje¹. São elas:

- 1ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Inércia: “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.”
- 2ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Dinâmica: “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.”
- 3ª Lei de Newton – Princípio da Ação e Reação: “A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.”

Nota-se que Newton usava muito o conceito de força em seus enunciados. Assim, para que essas frases tenham uma compreensão significativa e aplicável, é preciso definir o conceito de **força**.

¹ Os enunciados foram retirados do livro *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I*, traduzido da obra em inglês por tradutores da Edusp – Editora da Universidade de São Paulo.

Em geral, a ideia intuitiva do conceito de força está associada ao esforço muscular, bem como às palavras “puxar” e “empurrar”. Todavia, sabe-se que existem vários tipos de força, que descrevem os mais diversos fenômenos físicos e, assim, há uma importante relação que se deve ter em mente: independentemente de sua definição exata, sabe-se que a força é capaz de alterar o estado de movimento de um corpo. Em outras palavras, um corpo que está em repouso só irá se movimentar caso uma força não nula atue sobre ele. Da mesma maneira, um corpo que se move livremente em linha reta só pode acelerar, freiar ou realizar uma curva se uma força não nula atuar sobre ele. De forma simplificada, é este o significado da Lei da Inércia.

No cotidiano, observa-se a aplicação destes conceitos a todo momento. Só é possível caminhar pois a força de atrito atua sobre os pés. Realizar uma curva de bicicleta só é possível porque a força de atrito atua nos pneus. Um paraquedista diminui sua velocidade de queda ao abrir o paraquedas devido à força de resistência do ar. A queda dos objetos ocorre devido à força gravitacional. Em um momento certo passageiro está em repouso dentro de um avião estacionado no aeroporto, e minutos depois está a mais de 500 km/h pois o assento do avião está lhe empurrando.

O principal aqui é entender que a força não é necessária para a manutenção do movimento, como foi proposto por Aristóteles e manteve-se na mente dos filósofos e cientistas durante séculos. Entretanto, a força é necessária para que esse movimento inicie ou pare, ou de uma forma menos comum, aumente ou diminua. Esta última frase mostra que o movimento de um corpo pode ser quantificado e, convenientemente, o nome da grandeza associada a este fato é **quantidade de movimento**. Resumindo, a força tem a capacidade de alterar a quantidade de movimento de um corpo. Em termos simples, é isso que a Lei Fundamental da Dinâmica quer dizer.

A quantidade de movimento, também chamada de momento linear, é uma grandeza física vetorial, isto é, que possui direção e sentido, com um significado pouco intuitivo para a linguagem popular. Nas palavras do próprio Newton: “A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria”. Nesse sentido, entende-se que o significado de quantidade de movimento não pode ser reduzido simplesmente à velocidade, é necessário envolver a massa do corpo também. O momento linear é denotado por \vec{p} e sua definição matemática é dada por:

$$\vec{p} = m \vec{v}, \quad (1)$$

em que m é a massa e \vec{v} é a velocidade do corpo.

A partir do exposto, é possível chegar a duas conclusões lógicas de forma intuitiva. A primeira é que uma mesma força exercida em objetos de massas diferentes produzirá efeitos diferentes. Um corpo de menor massa adquirirá velocidade mais facilmente do que um corpo de maior massa se ambos forem empurrados com a mesma intensidade de força. A segunda é que um mesmo objeto pode adquirir mais ou menos velocidade dependendo da força, isto é, quanto maior a força, maior a velocidade adquirida pelo objeto. Essas conclusões nos levam à forma matemática da 2ª Lei de Newton:

$$\vec{F}_R = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad (2)$$

em que \vec{F}_R é a força resultante que atua no objeto e $d\vec{p}/dt$ é a taxa temporal de variação do momento linear do objeto. Decorre disso que a variação do momento linear tem o mesmo sentido da força.

No Ensino Médio, a maioria dos problemas de física considera que a massa do corpo é constante e, portanto, a Equação 2 acaba por tomar uma forma mais simples. Sob essa condição, pode-se manipular a Equação 2, chegando a:

$$\vec{F}_R = \frac{d\vec{p}}{dt} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = m \frac{d\vec{v}}{dt} \rightarrow \vec{F}_R = m\vec{a}, \quad (3)$$

em que \vec{a} é a aceleração adquirida pelo corpo.

A força resultante apresentada na forma da Equação 2 é de grande importância para o objetivo principal deste trabalho, que é ensinar o princípio de funcionamento das pinças ópticas. Entretanto, isso não significa que o pinçamento óptico ocorra em sistemas cuja massa seja variável. O motivo de tratar a 2ª Lei de Newton a partir do conceito de momento linear se dá pelo fato de que o objeto de estudo é a interação entre luz e matéria. Toda radiação carrega energia e momento, mas não possui a massa inercial m tão familiar aos alunos. Nesse sentido, é preferível associar força à variação de momento em vez de associá-la ao produto de massa e aceleração.

Para concluir este tópico de mecânica, resta comentar sobre o Princípio de Ação e Reação, aplicando-o a uma situação prática. De acordo com Newton, toda vez que um corpo A faz força \vec{F}_{AB} sobre um corpo B, este corpo B reage com uma força \vec{F}_{BA} sobre o corpo A. Sobre estas forças, sabe-se que:

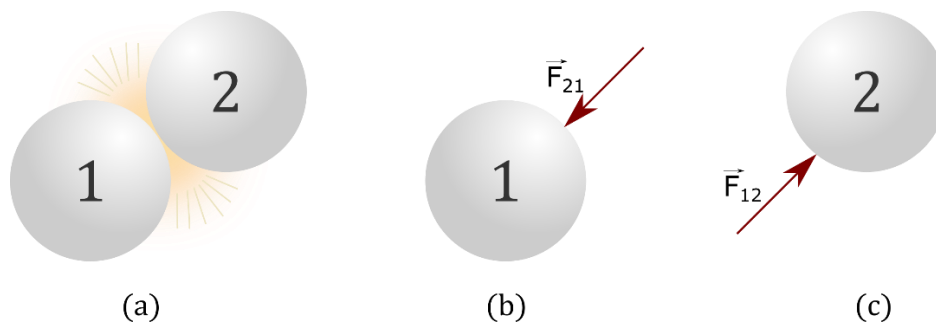
a) Possuem mesma intensidade, ou seja, $|\vec{F}_{AB}| = |\vec{F}_{BA}|$;

b) Possuem a mesma direção, mas sentidos opostos. Matematicamente, $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$.

A seguir é apresentado uma aplicação deste princípio em uma situação bastante familiar: o choque entre dois corpos esféricos, denominados esfera 1 e esfera 2, e a troca de força entre eles.

Em um choque entre as esferas, independentemente do estado de movimento inicial delas, sabe-se haverá trocas de forças. O raciocínio é o seguinte: se a força que a esfera 1 exerce sobre a esfera 2 produz uma alteração de momento $d\vec{p}_2$, então a força que esfera 2 exerce sobre a esfera 1 produz uma variação de momento $d\vec{p}_1$ no intervalo de tempo Δt que durou o choque. O esquema de forças está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - (a) Colisão entre as esferas 1 e 2; (b) força de contato na esfera 1; (c) força de contato na esfera 2.



Fonte: Próprio autor.

Sendo $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ e levando em consideração que estas representam as forças resultantes que atuam nas esferas durante o choque, pode-se demonstrar o que foi dito utilizando a Equação 2:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \quad (4)$$

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} = -\frac{d\vec{p}_1}{dt}. \quad (5)$$

Assim, conclui-se que:

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt} = 0. \quad (6)$$

De forma literal, a Equação 6 é interpretada como: “A soma das variações de momento linear das esferas 1 e 2 no mesmo intervalo de tempo é igual a zero”. Isso quer dizer que qualquer variação no momento linear da esfera 1 causado pela colisão implicará em uma igual variação no momento linear da esfera 2, mas em sentido contrário, de forma que a quantidade de movimento total do sistema continue a mesma de antes da colisão.

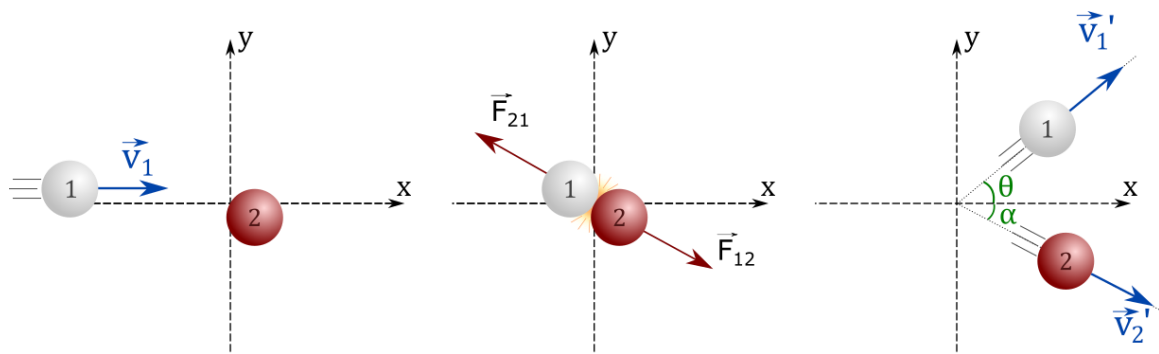
A linha de raciocínio comentada acima constitui o chamado **Princípio da Conservação do Momento Linear**, que enuncia que a quantidade total do momento de um sistema

permanece a mesma se não houver influência de forças externas. No caso das esferas do exemplo, as únicas forças atuantes no sistema são \vec{F}_{12} e \vec{F}_{21} que surgiram durante a colisão das esferas e, sendo assim, o momento total se conservou.

Convém notar que o caráter vetorial da Equação 6 mostra que o momento se conserva em todas as direções, não importando se a colisão é frontal ou oblíqua. Este princípio é tão relevante que mesmo quando a massa inercial não está presente, como no caso das radiações, ele é respeitado.

A Figura 2 ilustra outro choque entre as esferas 1 e 2, mas neste caso a colisão é oblíqua.

Figura 2 - Colisão oblíqua.



Fonte: Próprio autor.

A quantidade de movimento do sistema todo está inicialmente na esfera 1 que movimentava-se no sentido positivo do eixo x. Após a colisão, a esfera 1 movimentava-se na diagonal, com uma componente da velocidade no sentido positivo do eixo y e outra no sentido positivo do eixo x. Entretanto, como o sistema é isolado, não é possível que o mesmo possua uma quantidade de movimento total na direção y, uma vez que a quantidade de movimento inicial era apenas em x. O momento linear deve se conservar tanto em módulo quanto em direção e sentido. Conseqüentemente, a esfera 2 também se movimentará na diagonal após a colisão, porém, além de sua velocidade possuir uma componente na direção x, também terá uma componente na direção y, mas no sentido negativo. Isso decorre justamente porque esta componente da esfera 2 precisa anular a componente em y da esfera 1. Assim, a quantidade de movimento total continuará apenas na direção positiva do eixo x. Uma versão deste exemplo é apresentada posteriormente durante a explicação das pinças ópticas e, por este motivo, ele é particularmente importante.

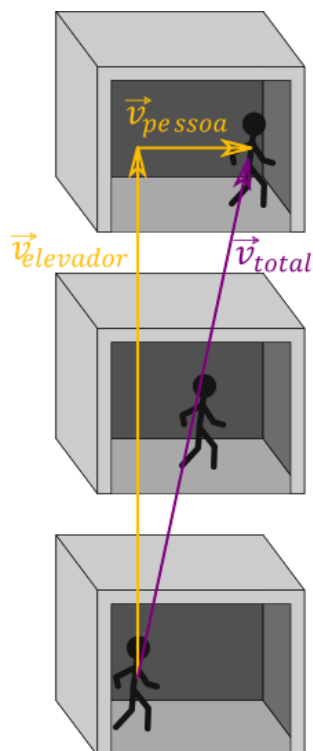
3.2 VETORES E OPERAÇÕES VETORIAIS

Grandezas vetoriais são aquelas que necessitam mais do que apenas um valor e uma unidade para serem definidas, precisam também de uma direção e um sentido. Massa, por exemplo, não é uma grandeza vetorial. Ela é uma medida da inércia e da quantidade de matéria de um corpo e não depende de qualquer informação direcional.

Força, como já demonstrado no tópico anterior, é uma grandeza vetorial, visto que sem definir sua direção, não há como compreender o evento. Por exemplo, há uma certa confusão para compreender o que uma pessoa fará ao dizer: “Vou fazer força sobre esta caixa”. Não há como prever com certeza o que ela irá fazer, pois pode empurrar, puxar, levantar ou até mesmo pressionar a caixa contra o chão. O efeito causado na caixa dependerá não somente da intensidade, mas da direção e sentido da aplicação dessa força. Neste mesmo raciocínio, explica-se a natureza vetorial do momento linear, uma vez que ele depende da direção e sentido da velocidade do corpo.

Vetores são representações gráficas destas grandezas e possuem tamanho (intensidade), direção e sentido. Em várias situações em física necessita-se da chamada **Análise Vetorial**, que consiste basicamente em analisar cada vetor em sua direção, para no final tirar alguma conclusão. Ao andar para a direita em um elevador em movimento de subida, por exemplo, pode-se determinar o deslocamento efetivo em relação à superfície terrestre a partir deste tipo de análise. Observando a Figura 3 percebe-se que a pessoa terá uma velocidade vertical $\vec{v}_{elevador}$ para cima, e uma velocidade horizontal \vec{v}_{pessoa} para a direita. Uma análise geométrica simples revela a formação de um triângulo de vetores. Assim, para determinar o deslocamento efetivo pode-se analisar cada movimento separadamente e, em seguida, uni-los utilizando o Teorema de Pitágoras.

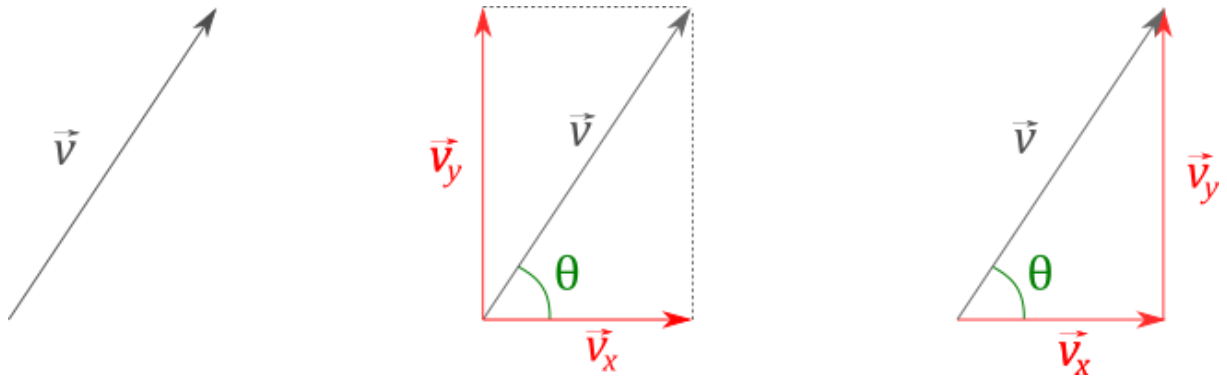
Figura 3 - Composição vetorial de movimentos em um elevador.



Fonte: Próprio autor.

A análise é diferente quando o problema cuja força ou velocidade não têm suas componentes de forma tão evidente. No caso do lançamento de um objeto qualquer, cuja velocidade é inicialmente oblíqua aos eixos vertical e horizontal, a trajetória é uma parábola e suas componentes não possuem origens distintas. Neste caso, também separam-se os cálculos dos dois movimentos (horizontal e vertical), mas como as componentes da velocidade nesse caso não são tão óbvias, utiliza-se um método denominado **Decomposição de Vetores**. A partir dele, transforma-se o vetor velocidade, inicialmente oblíquo, em duas componentes ortogonais mais simples de trabalhar: uma velocidade vertical variável e uma velocidade horizontal constante.

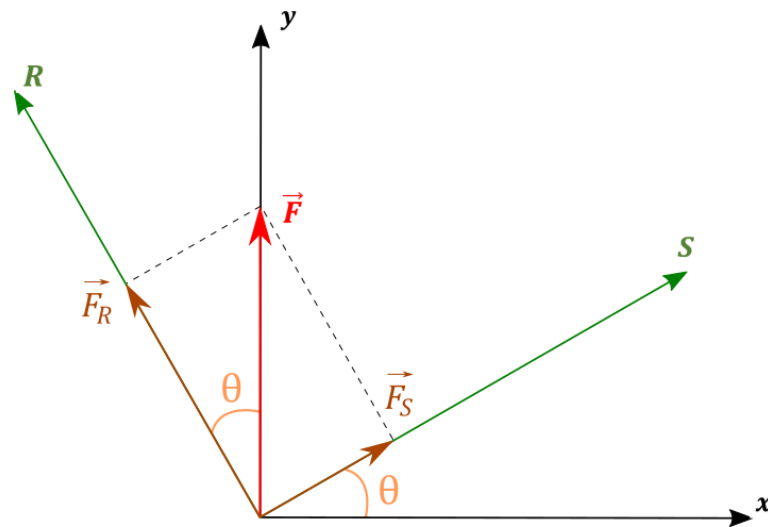
Para decompor vetores utiliza-se simples trigonometria. O vetor \vec{v} da Figura 4, por exemplo, pode ser decomposto em duas componentes \vec{v}_x e \vec{v}_y utilizando as relações geométricas de seno e cosseno para um triângulo retângulo. Sendo assim, observa-se que $|\vec{v}_x| = |\vec{v}| \cos \theta$ e $|\vec{v}_y| = |\vec{v}| \sin \theta$. Além disso, pode-se perceber também que $|\vec{v}|^2 = |\vec{v}_x|^2 + |\vec{v}_y|^2$.

Figura 4 - Vetor \vec{v} e suas componentes ortogonais.

Fonte: Próprio autor.

É interessante comentar que este método não se limita a encontrar vetores nas direções dos eixos cartesianos. Existem situações em que se faz necessária a decomposição de um vetor em eixos auxiliares, mesmo que ele seja totalmente vertical ou horizontal. Exemplos como esse são vistos no Ensino Médio principalmente em casos de plano inclinado, onde o vetor de força peso do objeto é vertical, mas como o movimento é diagonal, ele é dividido em duas direções perpendiculares, uma tangente e outra normal ao movimento.

A Figura 5 mostra um vetor arbitrário vertical \vec{F} e suas componentes ortogonais nas direções de eixos auxiliares R e S , que são perpendiculares entre si e possuem um deslocamento angular θ em relação aos eixos cartesianos x e y . A partir de uma simples análise geométrica, verifica-se que $|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cos \theta$ e $|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \sin \theta$.

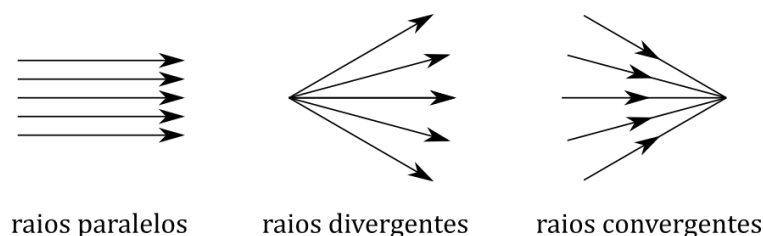
Figura 5 - Componentes da força F na direção dos eixos auxiliares R e S .

Fonte: Próprio autor.

3.3 ÓPTICA GEOMÉTRICA

Antes de iniciar este tópico é importante deixar claro os limites teóricos que compõe o texto. Embora a teoria moderna da luz destaque que ela possui caráter ondulatório e corpuscular dependendo de como a medimos, calculamos ou observamos, este tópico está associado ao chamado limite da Óptica Geométrica. Neste limite, considera-se que a luz é composta de vários “raios” (Figura 6) que possuem propagação retilínea em meios homogêneos e podem sofrer desvios ao incidir em superfícies. Além disso, os efeitos mais comuns do caráter ondulatório da luz como interferência e difração são desprezados, visto que as dimensões dos obstáculos, objetos e anteparos são muito maiores do que os comprimentos de onda das radiações que estudaremos. A visualização destes efeitos, nestes casos, é prejudicada.

Figura 6 - Representação dos raios de luz.



Fonte: Próprio autor.

Ainda assim, as propriedades inerentes à natureza ondulatória da luz mantém-se presentes ao longo de todo o texto. A luz é uma onda eletromagnética e, como tal, possui frequência, comprimento de onda, transporta energia e possui velocidade constante para um meio homogêneo.

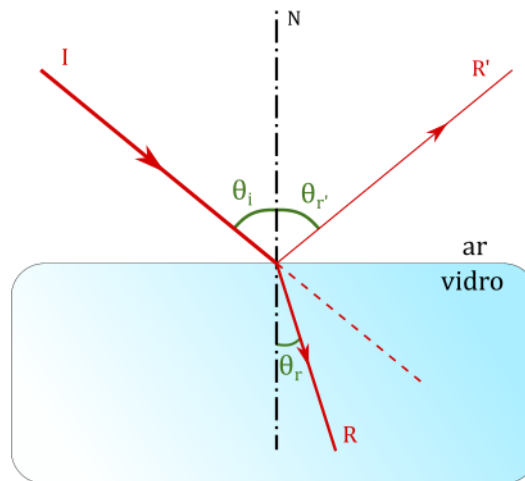
Delimitado o campo de abordagem, pode-se explorar os significados e características dos fenômenos ópticos principais que decorrem da incidência de um raio de luz em uma superfície. São eles: a **reflexão**, a **refração** e a **absorção**.

A absorção ocorre quando o raio incide em uma superfície, mas não a atravessa e tampouco volta para o meio de origem. O resultado é que a superfície que absorve a radiação eleva sua temperatura. Em geral, objetos com cores escuras tendem a ter maior absorção da radiação incidente em relação a objetos de cores mais claras.

A refração e a reflexão podem ser explicadas utilizando-se um único exemplo: um raio de luz incidindo na superfície que separa o ar atmosférico de um bloco de vidro, também chamada de interface ar-vidro, com um ângulo de incidência θ_i . Ao observar a Figura 7, percebe-se que parte do raio de luz que incide na interface (raio I) origina um raio **refletido** R' que volta ao ar e um raio **refratado** R transmitido para o vidro.

A trajetória do raio R' está de acordo com a chamada Lei da Reflexão, que diz que o ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de reflexão, isto é, $\theta_i = \theta_{r'}$. Além disso, o raio refletido está contido no mesmo plano do raio incidente e da reta normal à superfície. Nota-se que o comportamento do raio refletido é simétrico e intuitivo, diferentemente do raio refratado, que neste caso sofre um desvio em sua trajetória.

Figura 7 - Raio de luz incidindo obliquamente na interface ar-vidro.



Fonte: Próprio autor.

Quando o raio passa para outro meio com diferentes características, sua velocidade de propagação é alterada e a este fenômeno dá-se o nome de refração. Uma confusão muito comum é associar o significado de refração ao desvio do raio de luz quando este passa de um meio para outro, mas isso é só uma consequência que ocorre nos casos em que a incidência é oblíqua. Caso a incidência do raio seja perpendicular à interface de separação entre os meios, sua direção de propagação não sofre desvio, mas sua velocidade se altera.

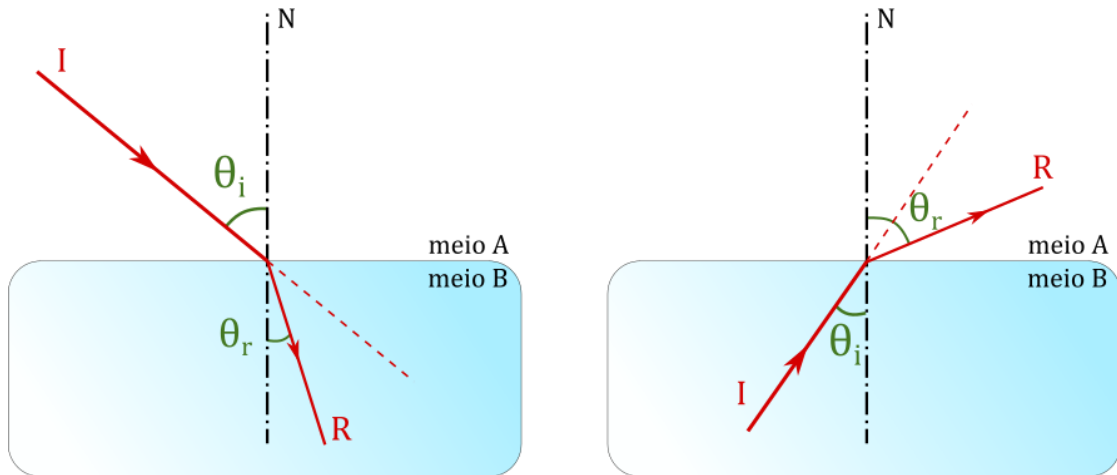
A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz no meio (v) é chamada de **índice de refração do meio**, simbolizado pela letra n como mostra a Equação 7:

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

O índice de refração pode ser entendido como a dificuldade que o meio oferece à propagação de determinada radiação. Assim, quanto maior o índice de refração, menor a velocidade de propagação. Diz-se, quando um meio B possui índice de refração maior que um meio A, ou seja, $n_B > n_A$, que o meio B é **mais refringente** do que o meio A. Assim, para refrações com incidências oblíquas, vale a seguinte regra: quando um raio passa de um meio **menos** refringente para um meio **mais** refringente, sua direção é alterada de modo a se

aproximar da reta normal à superfície de separação. O contrário é verdadeiro, isto é, quando um raio passa de um meio **mais** refringente para um meio **menos** refringente, sua direção é alterada de modo a se afastar da reta normal à superfície de separação. Esta regra pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 - Refração para $n_B > n_A$.



Fonte: Próprio autor.

O comportamento de um raio refratado é dado por uma relação matemática conhecida como Lei de Snell-Descartes:

$$n_1 \sen \theta_i = n_2 \sen \theta_r. \quad (8)$$

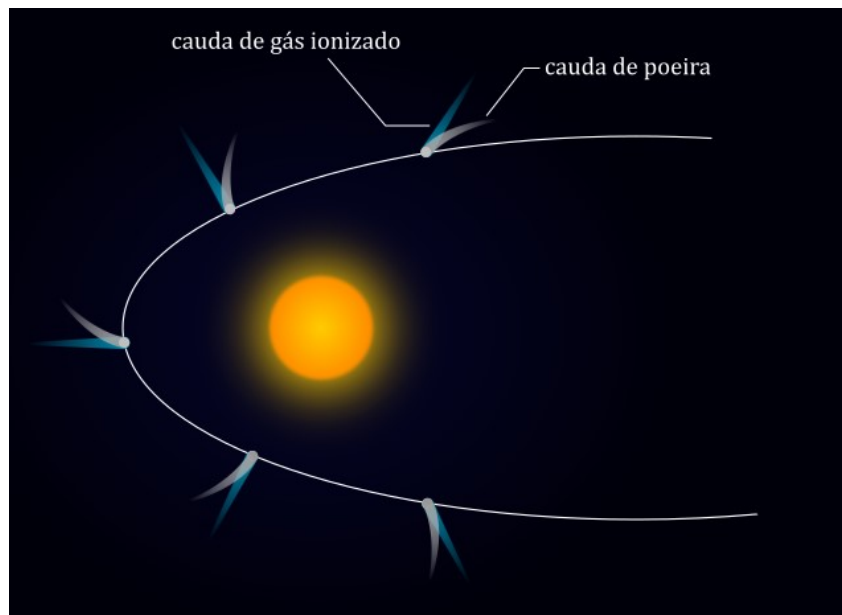
Note que na Equação 8 os índices de refração não estão relacionados diretamente aos meios A e B, mas levam os números 1 e 2 que significam o meio de onde o raio vem e o meio para onde o raio vai, respectivamente.

3.4 PRESSÃO DE RADIAÇÃO

Sabe-se que toda radiação transporta energia, denominada energia radiante. Não fosse por isso as plantas não poderiam realizar a fotossíntese, processo em que se converte a energia proveniente da luz solar em energia química. Além disso, é possível sentir a energia da radiação solar simplesmente expondo a própria pele à luz de um dia ensolarado. Neste caso, a energia radiante transforma-se em energia térmica. Este tema é muito comum e amplamente trabalhado ao longo da Educação Básica. Entretanto, um efeito da luz ou radiação, que é pouco comentado ou sequer apresentado, está relacionado à sua capacidade de exercer força em superfícies que atinge.

Embora não seja facilmente perceptível no cotidiano, a ideia de que radiação pode exercer pressão é muito antiga. Em sua tese, Zanuto (2015) apresenta o histórico de observação e desenvolvimento teórico e experimental sobre o efeito da pressão de radiação. O primeiro relato documentado sobre pressão de radiação foi dado por Johannes Kepler, no ano de 1619. O astrônomo explicou, a partir de suas observações, o fato das caudas de cometas que orbitavam o Sol serem repelidas por ele, como se fossem empurradas por sua radiação. Esta situação pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 - Cometas ao redor do Sol com suas caudas sob influência da pressão de radiação.



Fonte: Próprio autor.

Embora o trabalho de Kepler tenha gerado muita discussão na época, essa previsão só foi comprovada teoricamente por James Clerk Maxwell em 1873. Segundo ele, as forças exercidas pela luz são resultado do momento linear que reside nos campos eletromagnéticos da própria luz. Mais especificamente, o momento é resultado da ação conjunta da componente elétrica da radiação, que movimenta os elétrons do objeto que atinge de forma oscilatória, e da componente magnética da radiação, que exerce uma força sobre a carga em movimento (FEYNMAN et al., 2010, p.607).

É importante notar que, uma vez que a luz não possui massa inercial, não é possível descrever seu momento linear nos termos da Equação 1. Entretanto, há uma relação matemática que permite expressá-lo em termos da energia E da radiação, conforme a Equação 9 (NUSSENZVEIG, 1998, p.215).

$$p = \frac{E}{c}. \quad (9)$$

Outra maneira de interpretar o momento linear da luz está associada ao nascimento da **física quântica**. Em 1900, Max Planck, um dos fundadores da teoria quântica, apresentou a proposta de que a radiação não transfere energia de forma contínua, mas sim discreta. Isso significa que a energia de uma radiação não pode apresentar qualquer valor, apenas múltiplos de uma quantidade mínima, denominada *quantum* de energia. Em 1905, para explicar o **Efeito Fotoelétrico**, Einstein propôs que a radiação é composta de vários pacotes de energia, ou vários *quanta* (plural de *quantum*). Gilbert Lewis cunhou o termo **fóton** para descrever estes pacotes de energia em 1926 (NUSSENZVEIG, 1998, p.246). Assim, os fótons são comumente associados a partículas de luz que não possuem massa inercial, embora possuam momento e energia. Cada fóton que compõe determinada radiação possui uma energia dada pela Equação 10, onde h é a constante de Planck, f a frequência da radiação e λ o comprimento de onda associado à radiação.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}. \quad (10)$$

Em seu livro, Feynman (2010, p.210) traz um paralelo interessante entre o momento linear associado a partículas e a radiações. Enquanto o momento linear de partículas está associado ao produto $m v$, o momento linear das radiações está associado ao número de ondas por unidade de comprimento. Assim, quanto menor for o comprimento de onda, maior será o número de ondas por unidade de comprimento e, por consequência, maior será o momento da radiação. Isto é facilmente demonstrado ao substituir a Equação 10 na Equação 9,

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (11)$$

De fato, apesar das diferenças de interpretação, a lei de conservação do momento linear continua válida nos domínios da física quântica (FEYNMAN et al., 2010, p.211). Assim, a relação do momento linear da radiação com a força que esta pode exercer sobre uma superfície decorre desta lei, exposta previamente.

Para exemplificar, pode-se usar a situação da colisão mostrada na Figura 2. Quando a esfera 1 colide com a esfera 2, há transferência de momento linear causada pelas forças do choque. Ao mesmo tempo que a força \vec{F}_{21} reduz a quantidade de movimento da esfera 1, a força \vec{F}_{12} aumenta o momento linear da esfera 2, de acordo com a 2ª Lei de Newton. Analogamente, quando a luz incide em um espelho e é refletida em outra direção, o seu momento linear é alterado e, como em uma colisão, a luz exerce força no espelho (POŽAR et al., 2018). Este é o princípio de funcionamento das velas solares.

Como dito anteriormente, a energia de um único fóton é dada por hf e, sendo assim, a energia total de uma radiação é a soma das energias individuais de cada fóton que a compõe. Ashkin (2000) mostra uma forma interessante de estimar a intensidade da força que uma radiação pode exercer sobre uma superfície. Suponha uma situação em que um feixe laser com potência P atinja um espelho perfeitamente reflexivo de forma ortogonal. A energia do feixe laser durante um intervalo de tempo Δt é dada por $E_{total} = P \Delta t$. A quantidade de fótons que atinge o espelho neste intervalo de tempo é E_{total}/hf e cada um dos fótons possui um momento dado pela Equação 11. Após a reflexão, os fótons mantêm sua direção, mas trocam o sentido de propagação. Assim, associando essa colisão à 2ª Lei de Newton, tem-se que a força que cada fóton exerce sobre o espelho é dada por:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{fóton} - (-p_{fóton})}{\Delta t} = \frac{2p_{fóton}}{\Delta t} = \frac{2hf}{c \Delta t}. \quad (12)$$

Multiplicando a força exercida por cada fóton pelo número de fótons que atingem o espelho no intervalo de tempo Δt , tem-se:

$$F = \left(\frac{E_{total}}{hf} \right) \left(\frac{2hf}{c \Delta t} \right) = \frac{2P}{c}. \quad (13)$$

Um apontador laser comum de 3 mW, utilizado por professores e apresentadores, por exemplo, causaria uma força no espelho da ordem de 20 piconewtons (20×10^{-12} N).

Percebe-se, pelo que foi exposto, que a dedução matemática para a estimativa da força total exercida pela radiação é relativamente simples. Entretanto, historicamente, a comprovação experimental da pressão de radiação sempre foi um problema. Isolar essa variável de forma que fatores externos não influenciem na medição não é uma tarefa fácil. Zanutto (2015) apresenta uma série de experimentos e estudos que foram sendo aprimorados ao longo tempo, com o objetivo de reduzir os erros de medição, desde 1873.

Uma superfície pode absorver parte da radiação incidente, aumentando a sua temperatura. Por este motivo, sempre houve grande dificuldade em realizar experimentos que conseguissem medir a pressão de radiação, pois as chamadas **forças radiométricas** se faziam presentes, prejudicando os resultados (ASHKIN, 1970). Estas forças são decorrentes, por exemplo, do movimento das massas gasosas devido à diferença de temperatura. O gás quente tende a subir por ser menos denso e o gás frio tende a descer por ser mais denso. Este tipo de movimento prejudicava qualquer medida de deslocamento causada pela incidência da radiação: “Este corpo moveu-se por ação da pressão de radiação, ou pelo movimento das massas gasosas?”

Um equipamento desenvolvido para o estudo da pressão de radiação que ilustra o que foi comentado é o do Radiômetro de Crookes, inventado pelo químico Sir William Crookes em 1873 (CROOKES, 1874), e é apresentado na Figura 10. Trata-se de um bulbo de vidro preenchido com gás a baixa pressão (vácuo parcial) e hélices montadas em um eixo. Como se pode perceber, cada uma dessas hélices é pintada de cor preta de um lado e polida do outro. Ao incidir radiação sobre o radiômetro, observa-se que as hélices começam a se mover. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a velocidade das hélices.

Figura 10 - Radiômetro de Crookes.



Fonte: Sala de Física.²

Segundo Crookes, o movimento das hélices se dava pelo choque dos fótons ao incidirem sobre elas. Uma explicação aparentemente plausível, porém, equivocada. Como superfícies polidas refletem mais radiação do que superfícies escuras, o momento linear que os fótons transferem ao lado polido da hélice certamente é maior do que do lado preto. Assim sendo, os fótons deveriam empurrar o lado polido. Entretanto, o sentido do movimento de rotação é, na prática, o oposto do esperado. O que ocorre na realidade é que o lado de cor escura absorve maior radiação, elevando sua própria temperatura e do gás em contato com ela. Assim, o gradiente de temperatura e a diferença de pressão gera correntes de convecção que promovem um movimento que empurra a parte escura da hélice.

É interessante notar que, embora a intensidade dessas forças radiométricas seja muito pequena, a intensidade da pressão de radiação também é. Uma partícula que possui massa suficientemente pequena para sofrer ação de uma pressão de radiação, certamente sofre

² <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/radiometro.html>

influência do movimento do fluido que compõe o meio em que a partícula se encontra. Outrossim, dependendo do material que compõe a partícula, este poderia se deformar devido à ação térmica da absorção da radiação.

3.5 PINÇAS ÓPTICAS

Em 1969, um físico americano chamado Arthur Ashkin conseguiu driblar o problema das forças radiométricas e realizou um grande avanço ao utilizar pressão de radiação para acelerar e manipular pequenas partículas utilizando feixe laser (ASHKIN, 1970). Em seu experimento, Ashkin utilizou esferas de látex semitransparente suspensas livremente em água. Com apenas alguns miliwatts de potência, atingiu as partículas com um laser e observou que elas foram empurradas na direção de propagação da luz. Verificou que a velocidade que elas adquiriram estava aproximadamente de acordo com a estimativa da teoria, sugerindo que o efeito fosse realmente devido à pressão de radiação. Entretanto, um efeito inesperado apareceu: as partículas que estavam na borda do feixe laser estavam sendo arrastadas para a região de maior intensidade. Isso significa que as partículas não só estavam sendo empurradas na direção do feixe laser, como sendo atraídas para o centro deste. Mesmo movimentando o laser de um lado para outro, as partículas continuavam sendo atraídas para seu centro. Em outras palavras, as partículas estavam sendo guiadas pela luz (ASHKIN, 2000). A questão que surgia era se aquela força era também resultado da pressão de radiação. Para responder, é preciso entender as propriedades de um feixe laser semelhante ao utilizado por Ashkin.

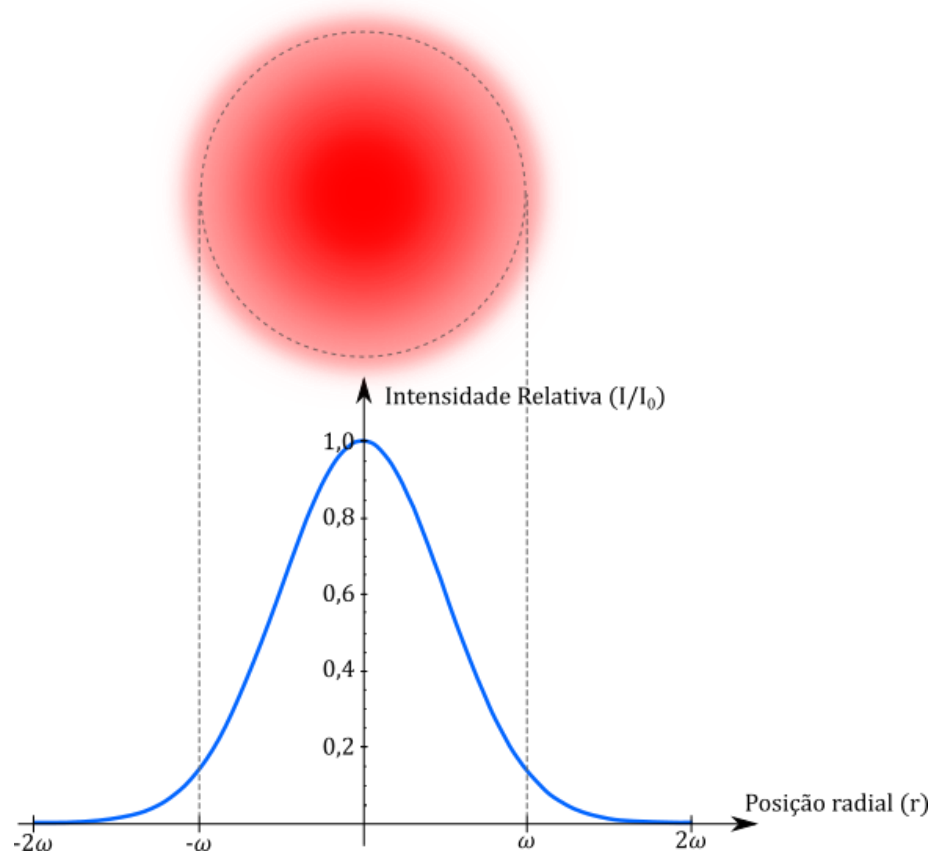
Algumas características de um feixe laser são: potência luminosa altamente focalizada, com uma única cor e com uma direção retilínea bem definida. Outra característica interessante é que a intensidade luminosa de um feixe laser não é uniforme ao longo da seção transversal do feixe, isto é, os raios de luz próximos ao eixo de propagação do laser tendem a ser mais intensos. Essa variação de luminosidade pode se apresentar de maneiras diferentes, entretanto, o laser que Ashkin usou possuía **perfil gaussiano** (Ashkin, 1970 e 2000). A intensidade luminosa de um feixe gaussiano (TEM₀₀), em um plano transversal ao eixo de propagação, é simétrica em torno do eixo central e pode ser escrita matematicamente por (HECHT, 2003):

$$I = I_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}}, \quad (14)$$

em que I_0 é a intensidade luminosa no centro do laser, r é a distância radial do eixo central e ω é o raio do feixe laser. Em $r = \omega$, a intensidade é I_0/e^2 , que representa 13,5% da intensidade em $r = 0$. A maior parte da energia do feixe reside dentro desse círculo imaginário de raio ω .

Na Figura 11 é apresentada a variação da intensidade luminosa de acordo com a posição radial para este tipo de laser. É possível notar que quanto mais próximo do centro do feixe, maior a intensidade luminosa.

Figura 11 – Intensidade relativa I/I_0 de um feixe laser com perfil gaussiano em função da posição radial r .



Fonte: Próprio autor.

A seguir são apresentadas algumas conclusões de Ashkin (1970) a respeito dos fenômenos observados. Entretanto, é importante ressaltar os limites teóricos dentro dos quais as explicações a seguir são válidas.

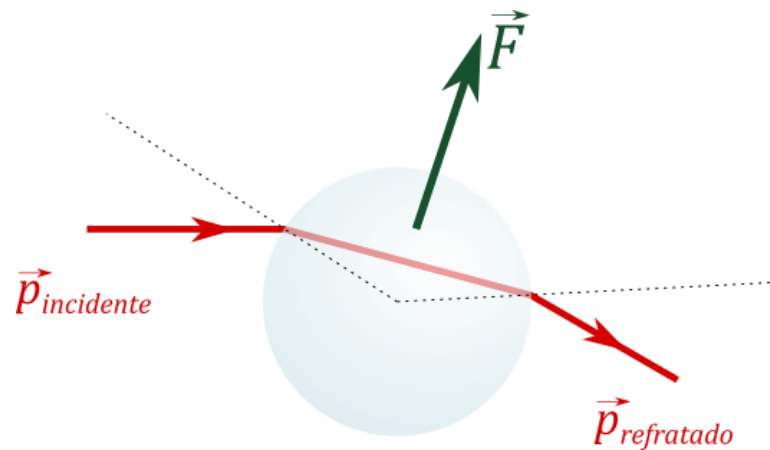
Há diversas teorias sobre como a luz consegue manipular objetos. Cada uma trata de uma relação específica entre o tamanho do objeto a ser manipulado e o comprimento de onda do laser utilizado. Alves (2012) faz uma abordagem interessante de cada uma das teorias, enfatizando os limites de cada uma. São basicamente três: a Teoria da Óptica Geométrica, para microesferas com diâmetros muito maiores que o comprimento da luz ($d \gg \lambda$); a Teoria de Rayleigh, para microesferas com diâmetros muito menores que o comprimento da luz ($d \ll \lambda$); e a Teoria MDSA (Mie-Debye com aberração esférica), que é a mais ampla e geral, e conseqüentemente mais complexa, utilizada para tamanhos arbitrários de microesferas.

A explicação de Ashkin (1970) sobre o fenômeno utiliza o limite da óptica geométrica, considerando o laser como um feixe de infinitos raios de luz. Essa é a abordagem mais simples

e intuitiva para ser explicada aos alunos do Ensino Médio. Para entendê-la, dois conceitos já apresentados são necessários: o fenômeno óptico da refração e a transferência de momento linear em uma colisão.

A Figura 12 mostra o que ocorre quando um raio de luz atinge uma esfera transparente com índice de refração superior ao meio onde está imersa. As linhas tracejadas partem do centro da esfera e indicam as retas normais às superfícies de separação por onde o raio passa.

Figura 12 - Refração de um raio de luz em uma esfera de material transparente.

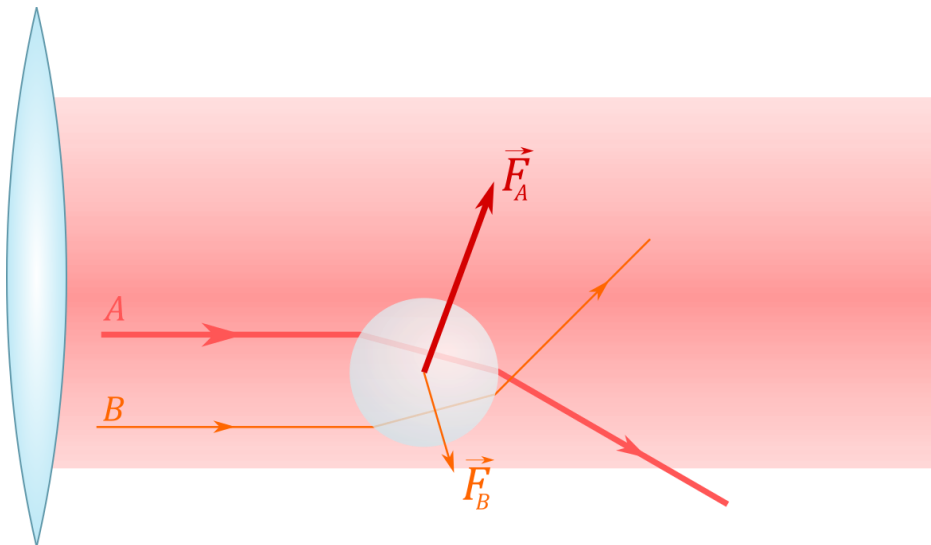


Fonte: Próprio autor.

Note que quando o raio de luz desvia, os fótons que o compõe tiveram a direção do seu momento linear alterado e, assim como no exemplo da colisão oblíqua das bolas de bilhar, a conservação do momento exige o surgimento de uma força na esfera para compensar esse desvio.

A Figura 13 ilustra uma esfera sendo atingida por dois raios A e B arbitrários, paralelos entre si, representando a interação entre a luz do laser e a partícula, assim como no experimento de Ashkin. Note que a esfera encontra-se em uma região de influência do laser, mas fora do centro deste. A refração dos raios na esfera faz com que duas forças \vec{F}_A e \vec{F}_B apareçam como explicado anteriormente. A força que puxa a partícula para o centro do feixe laser é maior do que a força que empurra ela para fora devido ao perfil gaussiano do feixe laser. Quanto maior a intensidade luminosa, maior a quantidade de fótons que compõe os raios de luz daquela região. Assim, como o raio A está em uma região de maior intensidade luminosa, a força produzida por seu desvio é, por consequência, maior.

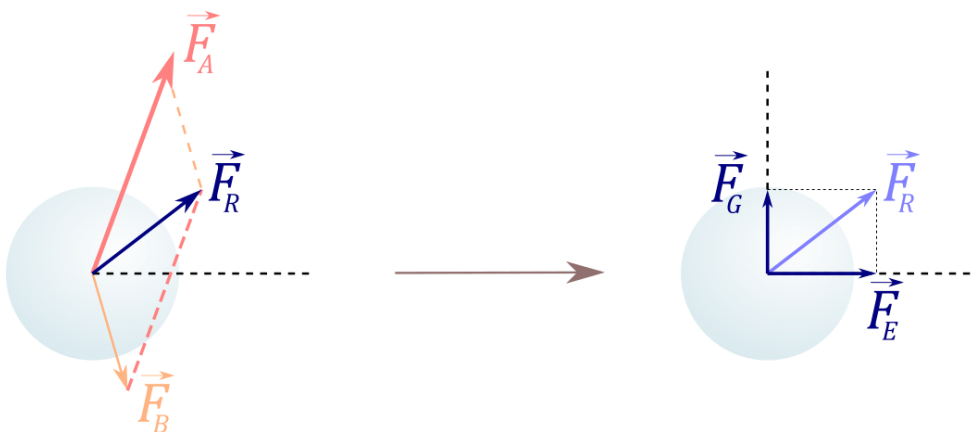
Figura 13 - Esquema de forças na esfera em razão dos raios refratados.



Fonte: Próprio autor.

A **força óptica resultante** \vec{F}_R , pode ser projetada em eixos ortogonais entre si, facilitando assim a diferenciação dos efeitos. A Figura 14 mostra a força óptica resultante com uma componente na direção de propagação do feixe e outra na direção radial do feixe. A primeira recebe o nome de **força de espalhamento** \vec{F}_E (traduzida do inglês, *scattering force*) e a segunda é denominada **força de gradiente** \vec{F}_G , justamente porque surge devido ao gradiente de intensidades do feixe laser (ASHKIN, 2000).

Figura 14 - Componentes da força óptica.



Fonte: Próprio autor.

Um ponto importante a ser mencionado é que as esferas utilizadas por Ashkin possuíam índice de refração superior ao meio em que estavam imersas. O látex possui índice de refração $n_{\text{látex}} \approx 1,58$ para o comprimento de onda do laser utilizado ($\lambda_e = 514,5 \text{ nm}$), e a água, $n_{\text{água}} \approx 1,33$. Assim, os desvios observados na Figura 13 estão de acordo com a Lei de Snell, e a esfera possui um comportamento óptico convergente. Não obstante, se o mesmo experimento

for realizado de forma que o meio apresente maior índice de refração do que o material da microesfera, esta apresentará um comportamento óptico divergente e a força de gradiente irá arrastá-la para fora do laser. Ashkin comprovou esta hipótese disparando um feixe laser contra bolhas de ar produzidas pela agitação de uma mistura de glicerol e água (ASHKIN, 1970).

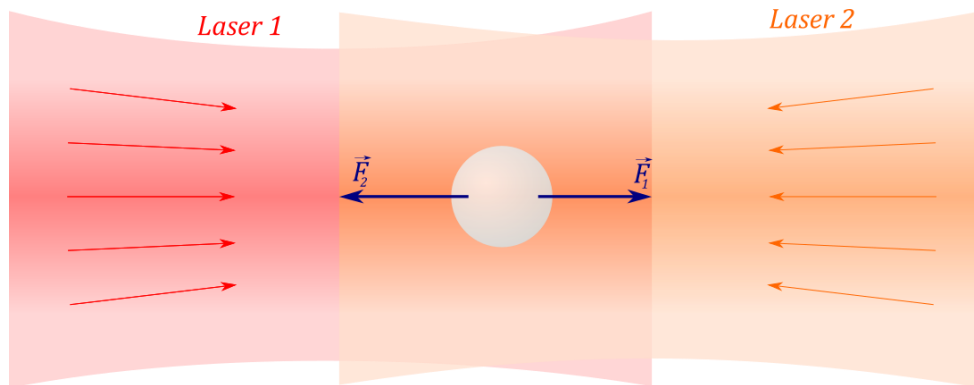
A partir destes experimentos vários estudos foram realizados na área de pressão de radiação e micropartículas, de forma que foram criadas novas áreas para desenvolvimento de tecnologias. Afinal, uma nova ferramenta para manipulação de matéria de forma remota, precisa e estéril havia sido descoberta. Entretanto, o foco deste trabalho reduz-se ao caminho que mostra o aperfeiçoamento das técnicas iniciais de Ashkin que levaram ao desenvolvimento da tecnologia das pinças ópticas utilizadas atualmente.

Como foi dito, as partículas são atraídas para o centro do feixe laser pela força de gradiente, mas este não é o único efeito. A força de espalhamento empurra as partículas até que elas colidam com o anteparo da câmara onde estão confinadas. Neves (2006) chama a atenção para a parcela de raios que reflete na superfície da esfera. Essas reflexões acabam por contribuir com a força de espalhamento. Entretanto, essa contribuição não é tão significativa para partículas altamente transparentes, já que a maior parte dos raios refrata³.

O conhecimento das propriedades das forças ópticas de gradiente e espalhamento permitiu o desenvolvimento do primeiro tipo de armadilha óptica tridimensional estável (ASHKIN, 1970 e 1997). Este modelo recebeu o nome de *2-BEAM TRAP* e consiste basicamente em atingir a microesfera com dois feixes lasers levemente focalizados, com mesma potência, mesmas dimensões e com sentidos opostos. Assim, enquanto a força de gradiente de ambos os lasers mantém a partícula estabilizada no centro dos feixes, as força de espalhamento são anuladas. A Figura 15 ilustra este tipo de armadilha óptica, mas é importante fazer uma ressalva: as cores da imagem são diferentes com o único intuito de facilitar a visualização, não indicando, portanto, que os lasers tenham qualquer diferença de comprimento de onda.

³ O coeficiente de reflexão pode ser obtido pela relação $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$. Utilizando os índices n_1 e n_2 como sendo da água (1,33) e do látex (1,58), obtém-se que aproximadamente 0,74% dos raios de luz são refletidos. Esta relação, obtida de Griffiths (2011), é uma aproximação que vale para incidência normal, entretanto, deixa claro que uma parcela muito pequena dos raios é refletida.

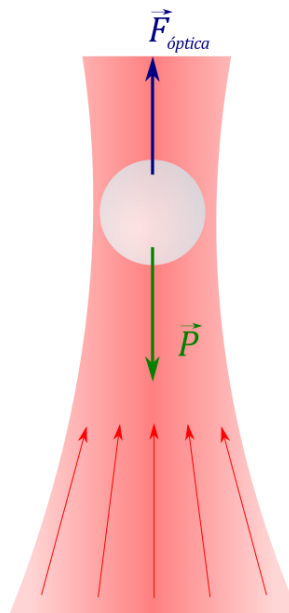
Figura 15 - Armadilha óptica constituída por dois feixes laser.



Fonte: Próprio autor.

Outro experimento muito interessante é a levitação de pequenas partículas utilizando a força da pressão de radiação e a estabilidade oferecida pela força de gradiente. Como mostra a Figura 16, contrapondo a força peso com a força de espalhamento, as partículas podem ser manipuladas livremente simplesmente movendo o feixe laser (ASHKIN, 1977).

Figura 16 - Partícula levitando sob ação exclusiva da pressão de radiação.

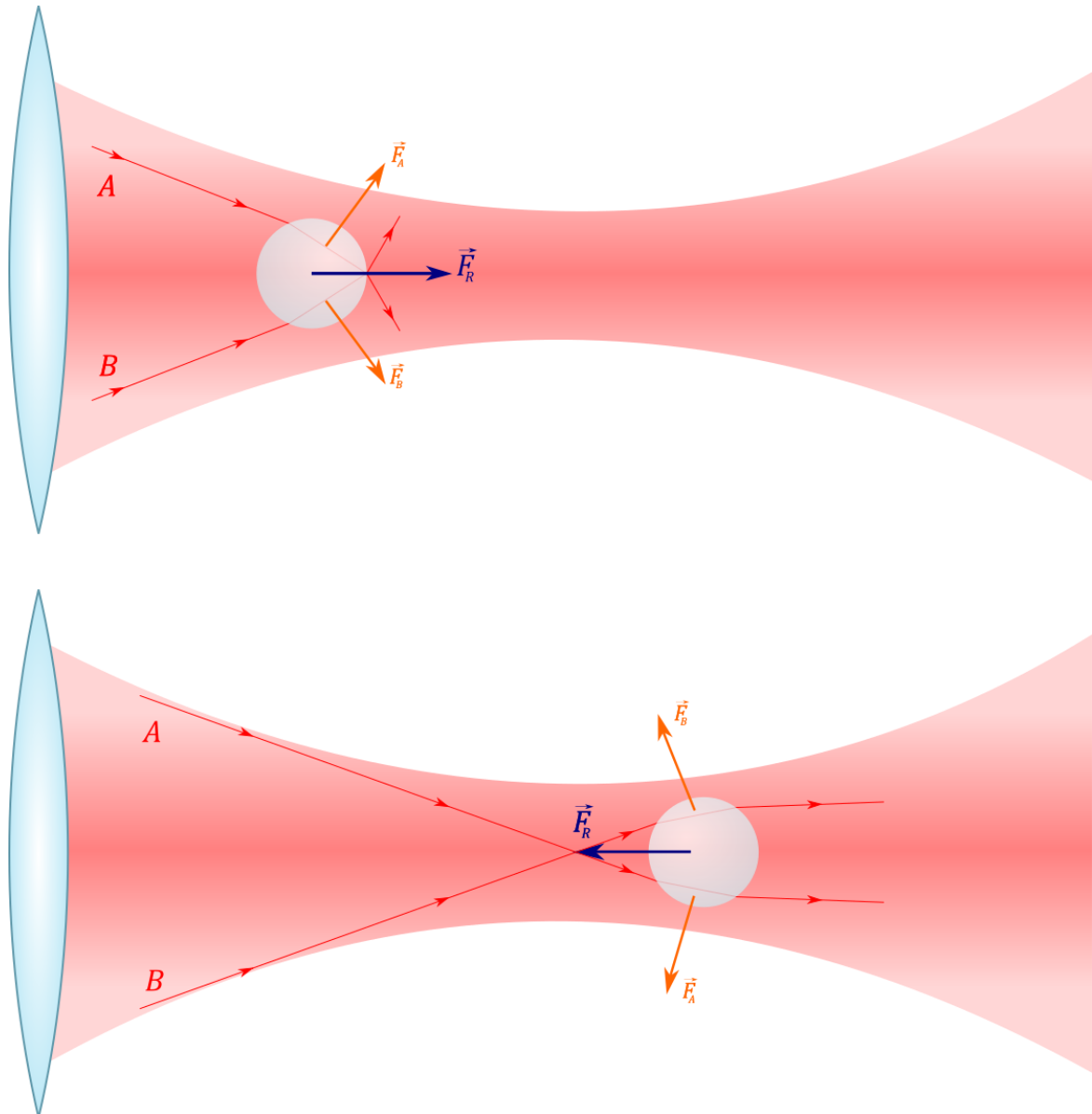


Fonte: Próprio autor.

Finalmente, em 1986, Ashkin publica um artigo revelando a observação da armadilha óptica tridimensional a partir de um único feixe laser. Utilizando um laser altamente focalizado, as forças ópticas que atuam na partícula tendem a levá-la sempre à região de maior intensidade luminosa que, neste caso, é exatamente no ponto focal do laser (ASHKIN, 1986). A Figura 17 mostra como a partícula é sempre direcionada para o mesmo ponto, independentemente de estar à frente ou atrás da cintura (foco) do feixe laser. É possível observar os desvios causados nos raios devido à refração e o surgimento das forças ópticas. Este é o modelo do que chamamos

hoje de **pinças ópticas**, uma ferramenta de luz que, com um único feixe laser, pode manipular partículas. Note que alterando o foco da lente, é possível mover a partícula para frente ou para trás. Alterando a potência do laser, pode-se exercer maior ou menor força nas partículas⁴.

Figura 17 - Modelo de pinças ópticas utilizando um único feixe focalizado.



Fonte: Próprio autor.

A captura e manipulação óptica de átomos empregando pressão de radiação se tornou um objetivo para Arthur Ashkin e, junto com colaboradores, entre eles Steven Chu, executou

⁴ Considerando a origem de coordenadas na cintura do feixe laser (posição com menor raio), o raio do feixe a uma distância z pode ser descrito pela expressão $\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, sendo ω_0 o raio na cintura do feixe laser e λ o comprimento de onda do laser. Dessa forma, o feixe laser pode ser representado por uma hipérbole de revolução em torno do eixo z (HECHT, 2003).

uma série de experimentos sobre esse tema. Após uma série de avanços experimentais, a manipulação de átomo foi alcançada. Esses trabalhos fizeram parte das descobertas científicas sobre o aprisionamento e resfriamento de átomos que levou o Prêmio Nobel de Física de 1997 a ser concedido a Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji e William Phillips (ESSIAMBRE, 2021).

Ashkin aprisionou objetos esféricos utilizando pinça óptica. Mas, na época, não era claro se objetos com formatos irregulares poderiam ser capturados e manipulados utilizando laser. Arthur Ashkin e Joseph Dziedzic decidiram tentar capturar o vírus do mosaico do tabaco que possui uma forma semelhante a um cilindro, com comprimento cerca de 16 vezes maior do que o diâmetro. Os pesquisadores foram capazes de capturar o vírus por qualquer uma das extremidades e estabilizá-lo (ESSIAMBRE, 2021). Durante o estudo, notaram o surgimento de um número crescente de partículas estranhas, relativamente grandes, que ficavam presas e davam origem a um espalhamento de luz. Ao suspeitar de contaminação bacteriana acidental, introduziram a armadilha óptica em um microscópio combinando o aprisionamento com a visualização de alta resolução. Isso confirmou a captura de bactéria viva e sua subsequente morte induzida pela luz⁵ (ASHKIN, 1997).

O efeito de absorção da luz é particularmente importante no que diz respeito à aplicação da pinça óptica em sistemas biológicos, pois, por tratar de radiação altamente focalizada atingindo objetos que não são totalmente transparentes os efeitos térmicos não podem ser desprezados. Sabe-se que cada material possui um espectro de absorbância específico, isto é, absorve determinado comprimento de onda com maior ou menor intensidade. As folhas das plantas, por exemplo, possuem grande absorção das frequências na faixa da luz visível, exceto na cor verde que é em grande parte refletida. Assim, como sistemas biológicos são compostos de uma variedade de materiais, a escolha do laser correto é um grande desafio, pois a absorção da maioria das substâncias presentes deve ser mínima para que a temperatura do sistema não se eleve de forma considerável, aumentando assim o risco de destruir a amostra.

Ao realizar a alteração do laser utilizado na pinça óptica com emissão no verde (514,4 nm) para um laser com emissão no infravermelho (1064 nm) tornou-se possível manter bactérias e as células de levedura por horas isoladas. Foi possível, inclusive, observar a reprodução das células dentro da armadilha (ASHKIN, 1987). Ashkin e colaboradores exploraram o uso da pinça óptica em várias aplicações biológicas. Eles demonstraram que podiam capturar e manipular vírus, células vivas e componentes subcelulares. Esses

⁵ Arthur Ashkin cunhou o termo '*opticutition*' que significa morte pela luz.

experimentos levaram ao desenvolvimento de novas aplicações de pinças ópticas em biologia, sendo possível estudar com muita precisão as interações entre moléculas, incluindo DNA (ESSIAMBRE, 2021). Em 2018, Arthur Ashkin recebeu o prêmio Nobel de Física pela invenção das pinças ópticas e por suas aplicações nas ciências biológicas.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 ESTRUTURA DA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA

Para facilitar a compreensão das conexões que serão feitas ao longo do texto, é apresentada aqui a estrutura da proposta em formato de aulas de 50 minutos.

- **AULA 1** – Apresentação da pinça óptica, utilização de simulador e debate sobre hipóteses levantadas acerca dos fenômenos observados durante a aula.
- **AULA 2** – Teste de conhecimentos prévios.
- **AULA 3** – Explicação e/ou revisão dos conceitos físicos necessários para o entendimento da pinça óptica: Leis de Newton, conservação do momento linear, operações vetoriais e fenômenos ópticos.
- **AULA 4** – Integração dos conceitos apresentados na aula 3 e explicação dos princípios físicos que envolvem a pinça óptica.
- **AULA 5** – Avaliação final para verificar se há indícios de uma aprendizagem significativa.

O número de aulas foi pensado para uma turma de 3^a série do Ensino Médio e, portanto, pressupõe-se que a maior parte do conteúdo teórico contido no produto já tenha sido visto pelos alunos nos anos anteriores. A aula 3, neste contexto, serve como revisão dos principais conceitos, abordados de uma forma diferente, focando no objetivo principal que é a compreensão do pinçamento óptico. Sendo assim, o número de aulas é flexível, pois, caso o professor que aplicará a proposta sinta que a turma não está segura com apenas uma aula de revisão dos conceitos, pode-se aumentar o número de aulas destinadas ao conteúdo apresentado nas aulas 3 e 4.

Todas as aulas têm como suporte um material didático, elaborado pelo autor deste trabalho, em versão de manual do professor e em versão de texto didático para o aluno, apresentado no apêndice A. A escrita do conteúdo teórico de ambos os materiais foi feita com linguagem simples e informal, sem, no entanto, deixar de lado as nomenclaturas técnicas e próprias de cada conceito físico abordado, com o intuito de estabelecer conexão e manter a atenção do interlocutor.

O material mencionado contém:

- Conteúdo teórico com texto e imagens;
- Roteiro para o uso do simulador;

- Teste de conhecimentos prévios;
- Atividades avaliativas e reflexões;
- Sugestões de vídeos;
- Sugestões para a apresentação da aula (exclusivo do manual do professor).

Uma sugestão do que pode ser feito antes do início das aulas, caso o produto seja aplicado no contraturno, é a seleção dos alunos interessados em participar por meio de um formulário de inscrição. Embora pareça incomum, esta sugestão surge das duas condições básicas para uma aprendizagem significativa, segundo Ausubel: o material potencialmente significativo e a predisposição do aluno para aprender. Naturalmente, o aluno que quer apenas memorizar de forma mecânica ou participar das aulas pelos motivos errados, como ganhar nota extra, não obterá os reais benefícios de uma aprendizagem significativa. Ademais, os motivos que fazem os alunos participarem são diversos, mas os que mais se destacam são: curiosidade genuína para aumentar o próprio intelecto, revisão de conteúdo e melhor compreensão dos fenômenos físicos para uma melhor preparação para o vestibular.

É importante lembrar que a premissa básica para um aprendizado significativo é partir do que o aluno já sabe. Assim, por mais organizado, objetivo e claro que seja o material, ele é apenas “potencialmente” significativo, uma vez que é o aluno que irá produzir significados a partir das informações que irá receber. É papel do professor guiar o aluno ao longo das aulas de forma que as conexões sejam feitas de forma adequada.

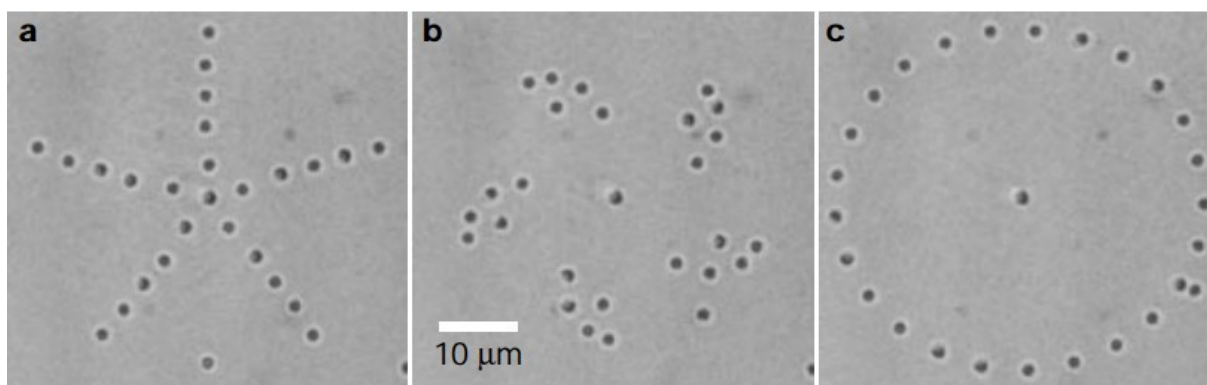
4.1.1 Apresentação das pinças ópticas e prática investigativa utilizando simulador

A **aula 1** foi projetada para ser motivacional e, ao mesmo tempo instrucional. Na parte inicial, é apresentada a tecnologia de forma expositiva, sem envolver muitos conceitos físicos, apenas o histórico e suas aplicações. O único fenômeno físico abordado, de forma superficial, é o da pressão de radiação, pois constitui a base do funcionamento das pinças ópticas. Embora seja muito provável que os alunos nunca tenham ouvido falar no fenômeno ou na tecnologia desenvolvida a partir dele, os subsunçores de *força* e *luz*, formados em momentos diferentes e provavelmente desconectados até então, começam a interagir com as novas informações modificando a estrutura cognitiva inicial para outra mais abrangente.

No início do manual do professor, há uma sugestão que refere-se à forma sobre como serão expostas estas informações. Uma vez que o assunto é novidade para a maioria dos alunos, se não para todos, provavelmente haverá muita dificuldade da parte deles para visualizar e

abstrair certos conceitos. Assim, sugere-se que o professor utilize de slides com figuras, vídeos e animações. Um exemplo é a Figura 18, que mostra uma pinça óptica manipulando pequenas partículas transparentes e formando desenhos com elas. Há de se convir que qualquer aluno teria certa dificuldade em visualizar esta situação na ausência de imagens. Por este motivo, uma sugestão de vídeo que mostra estas partículas em movimento encontra-se no manual do professor.

Figura 18 - Esferas de poliestireno e sílica formando configurações simétricas com o auxílio de uma única pinça óptica.

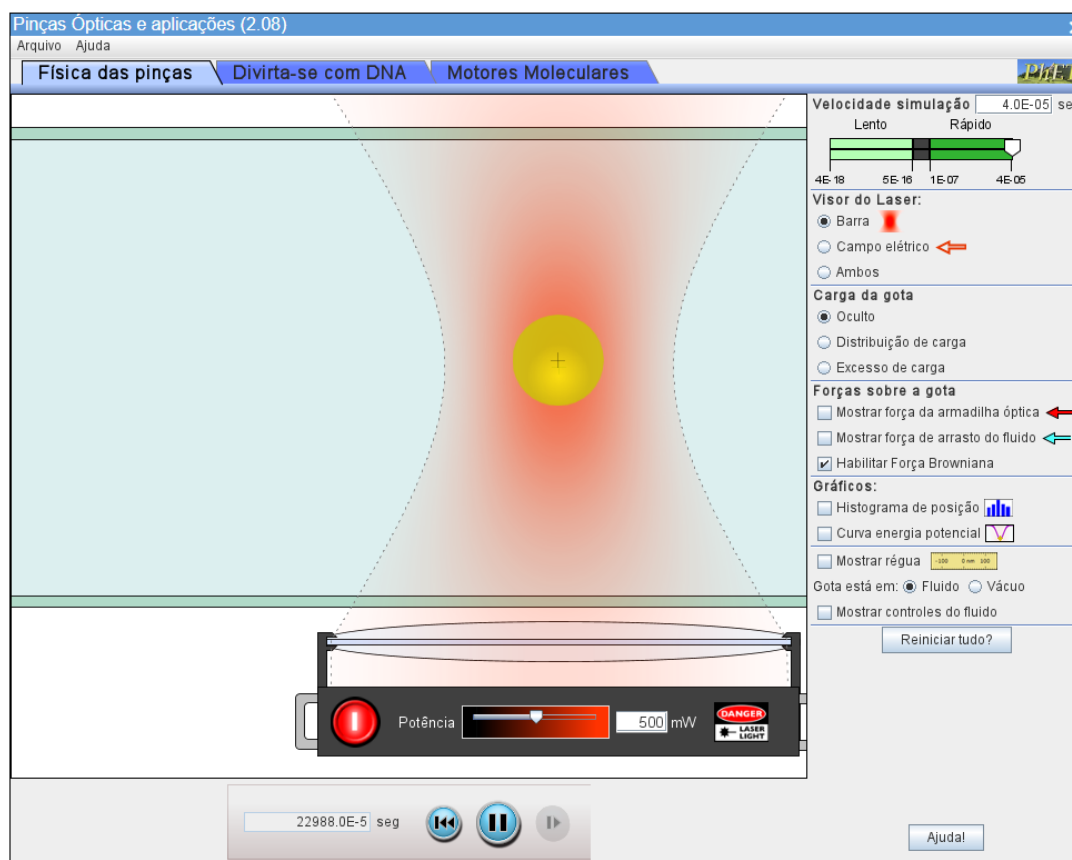


Fonte: Grier (2003).

Ao final da **aula 1**, os alunos serão guiados pelo professor na utilização de um simulador, com o objetivo de facilitar a visualização de alguns fenômenos e construir bases para o conhecimento que virá em aulas posteriores. O simulador faz parte da plataforma *PhET Interactive Simulations* e possui uma série de controles e configurações, como pode ser observado na Figura 19. Para auxiliar no direcionamento da aula durante a utilização do simulador, foi elaborado um roteiro que contém o passo-a-passo que mostra como acessá-lo, como configurá-lo para uma melhor visualização dos fenômenos e uma sequência de ações a serem realizados pelos alunos.

Sugere-se que o professor não dê explicações sobre os fenômenos observados, deixando que os alunos criem suas próprias hipóteses e teorias, com base em seus conhecimentos prévios. Ao longo da aula, os alunos respondem diversas questões que fazem parte do roteiro, a partir de suas próprias conclusões. Terminando a atividade, o professor pode esclarecer algumas dúvidas sobre os efeitos, mas apenas os relacionados aos conteúdos já vistos. Isso contribui para dar maior estabilidade cognitiva aos subsunçores, uma vez que as novas informações provenientes do debate poderão adquirir novos significados (MOREIRA, 2012b).

Figura 19 - Simulador de pinças ópticas e aplicações.



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.⁶

4.1.2 Teste de conhecimentos prévios

Não há muito o que comentar sobre a **aula 2**, uma vez que a esta altura, já está clara a importância de identificar os conhecimentos prévios dos alunos. Além disso, este teste pode servir de comparativo para a avaliação final da **aula 5**. No entanto, cabe dizer que neste teste será avaliado qual o nível de entendimento dos alunos com os temas: Leis de Newton, conservação do momento linear, operações com vetores e fenômenos ópticos. Todos são temas básicos aprendidos no ensino médio.

O motivo pelo qual o teste de conhecimentos prévios foi preferido para a segunda aula, ao invés da primeira tem relação com a motivação dos alunos. Como dito, a **aula 1** foi projetada para servir como uma forma de incentivo aos alunos, para que mantenham o interesse e o foco nas aulas posteriores. Assim, há pertinência em entregar a eles uma introdução sobre o assunto, mostrando os temas que serão abordados, a importância das aplicações das pinças ópticas no

⁶ https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/optical-tweezers

mundo contemporâneo e os caminhos de desenvolvimento tecnológico que as pinças ópticas abrem. Além disso, a utilização do simulador engaja os alunos e instiga sua curiosidade sobre os fenômenos observados.

Como os assuntos cobrados no teste de conhecimentos prévios são baseados em conteúdos que supostamente já foram apresentados aos alunos e, portanto, não tem relação alguma com a **aula 1**, não há problema em aplicá-lo na **aula 2**. Ademais, as respostas dadas pelos alunos são utilizadas para que o professor possa organizar suas aulas teóricas de acordo com o que eles já sabem. Este, como previamente explicado, é o ponto principal para direcioná-los à aprendizagem significativa.

Para atingir o objetivo comentado, o teste de conhecimentos prévios foi montado não como um simples questionário de múltipla escolha. Pelo contrário, envolve questões dissertativas, objetivas e de verdadeiro ou falso. Além disso, algumas questões avaliam conhecimento teórico e outras o conhecimento lógico-matemático. Os temas cobrados neste teste envolvem toda a matéria que será lecionada na **aula 3**, a saber: Leis de Newton e suas aplicações no cotidiano; momento linear como grandeza física e sua conservação; cálculos envolvendo vetores e suas componentes; fenômenos ópticos como reflexão, refração e absorção; e tópicos de Física Moderna.

Uma possibilidade peculiar à aplicação remota, mas que pode ser utilizada mesmo para aplicação presencial, é a de utilizar formulários online, como por exemplo o Formulário do Google⁷.

4.1.3 Revisão de conceitos em Mecânica e Óptica

A partir do resultado obtido na **aula 2** prepara-se a **aula 3**. Em casos críticos, pode ser que se note a completa ausência de subsunçores necessários à compreensão do conteúdo abordado. Neste ponto, entra a flexibilização do número de aulas. Caso o professor sinta necessidade, há a possibilidade de utilizar os chamados organizadores prévios, expostos no Capítulo 2. Nesse sentido, o professor pode montar a **aula 3** utilizando vídeos, exemplos práticos, situações-problema, reflexões, leituras e assim por diante. Pode ser que neste caso apenas uma aula de 50 minutos seja insuficiente para revisar todos os conceitos envolvidos. Por este motivo, no manual do professor encontra-se a informação de que o número de aulas

⁷ <https://docs.google.com/forms>

necessárias para a aplicação da proposta didático-pedagógica completa é de “5 a 7 aulas”, dando flexibilidade e uma folga tanto à **aula 3** quanto à **aula 4**.

A revisão teórica desta aula pode ser dividida em duas partes: a primeira envolvendo conceitos já vistos ao longo do Ensino Médio, como Leis de Newton, operações vetoriais e fenômenos ópticos; e a segunda envolvendo assuntos que são novidade para a maioria dos alunos, pois são assuntos de Física Moderna, como quantização da energia, comportamento dual da luz e fótons.

Ainda que a primeira parte da aula envolva assuntos que os alunos já viram, vale ressaltar que não será feita uma abordagem geral dos assuntos, mas bem específica e direcionada. A 2ª Lei de Newton, por exemplo, não é apresentada em sua forma convencional, mas em termos de variação temporal do momento linear. A equação geralmente apresentada aos alunos no Ensino Médio ($F_R = ma$) não é pertinente ao tema, pois o fenômeno das pinças ópticas advém da interação entre a radiação e a matéria, ou ainda, a força que a radiação consegue exercer em uma superfície. Assim, uma vez que luz não possui a massa inercial m , o Princípio Fundamental da Dinâmica precisa ser explorado de maneira diversa. Naturalmente, uma mudança como essa pode causar certos desequilíbrios cognitivos nos aprendizes. Por este motivo, o material didático contém uma explicação detalhada mostrando qual a diferença entre as duas abordagens, os motivos que levam a utilizar cada uma em determinada situação e como relacioná-las matematicamente.

Outro exemplo é a abordagem de colisões. Não há interesse em envolver conceitos como coeficiente de restituição ou os tipos de colisões. Não obstante, o assunto é restrito à análise vetorial da velocidade, isto é, a variação e a conservação do momento linear. Para isso, é claro, há o devido embasamento. O material possui uma seção inteira destinada para a teoria da projeção de vetores em eixos cartesianos e eixos ortogonais arbitrários.

Após a abordagem da parte de Mecânica, faz-se uma revisão dos fenômenos ópticos. Novamente, de forma direcionada. Não há interesse em entender, por exemplo, formação de imagens em espelhos ou lentes, mas sim o comportamento dos raios de luz ao atingirem uma superfície. Aborda-se reflexão e suas leis e a Lei de Snell para a refração. Nota-se que não há muita diferença de aulas expositivas convencionais para a forma como as matérias estão sendo apresentadas, somente o fato de que estão sendo ensinadas de forma específica e direcionadas com um objetivo final. Entretanto, dois processos muito importantes da teoria da aprendizagem significativa são considerados e que explicam a forma pela qual as matérias anteriores foram abordadas, tratam-se da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora.

O planejamento da **aula 3** deve levar em conta o fato de que cada um dos conteúdos apresentados possui suas especificidades e deve ser associado à realidade do aluno. Somente assim seus subsunçores serão capazes de acomodar a nova informação, modificando a estrutura cognitiva inicial e garantindo mais estabilidade a ela. Ao mesmo tempo, o material didático apresenta algumas reflexões que remetem à **aula 1** e conectam os conceitos aprendidos naquele momento aos conceitos revisados neste momento. Por exemplo, se o aluno compreendeu o significado de colisão, o significado de reflexão e o significado de pressão de radiação, é possível que comece a integrar todos estes conhecimentos se perguntados sobre o princípio de funcionamento de uma vela solar. Essa explicação será feita pelo professor na **aula 4**, entretanto, o questionamento já pode ser feito a partir de agora para provocar processos cognitivos que levem construção de hipóteses a partir dos conceitos aprendidos.

É interessante pensar como estes temas podem organizar-se de forma hierárquica na estrutura cognitiva do indivíduo. Os subsunçores de Mecânica e Óptica dão base para os fenômenos de reflexão, conservação do momento linear e Leis de Newton que, por sua vez, dão base ao funcionamento de uma vela solar. É a diferenciação progressiva ocorrendo simultaneamente à reconciliação integrativa.

A aula encerra com breves comentários sobre tópicos de Física Moderna. O objetivo é facilitar a compreensão dos conceitos novos que foram apresentados aos alunos, como o momento da luz. Por ser um fenômeno não observável no dia a dia, sua contextualização se faz necessária. Por isso, comenta-se sobre a quantização da energia, proposta por Max Planck, os pensamentos sobre a natureza dual da luz e, finalmente, fótons e uma forma de interpretá-los.

4.1.4 O princípio de funcionamento das pinças ópticas

Uma vez que o aluno compreende a diferença entre cada conceito, é possível passar à **aula 4** e explicar, finalmente, o funcionamento das pinças ópticas. Novamente, os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integradora se destacam, sendo este último perfeitamente visualizável. É principalmente neste ponto que é possível entender como o ensino de pinças ópticas facilita o processo de aprendizagem, uma vez que integra os campos da Mecânica e Óptica, até então separados, a partir de uma aplicação tecnológica do mundo contemporâneo. Não obstante, é importante notar que provavelmente tudo o que for apresentado nesta aula será novidade para os alunos. A aula segue uma sequência lógica onde cada tema forma uma base para o entendimento do tema subsequente. Assim, uma aula mais dinâmica

com perguntas, reflexões e pedidos de participação para os alunos por parte do professor pode ser uma boa ideia para mantê-los conectados ao longo da explicação.

O primeiro tema é sobre a pressão de radiação. O material apresenta uma estimativa matemática bem simples da força que a luz pode exercer em uma superfície refletora, como um espelho plano. O objetivo é fornecer ao aluno um valor que ele possa dar significado, uma vez que o fenômeno nunca fora observado em seu dia a dia. O interessante é que o valor obtido pelos cálculos mostra que uma radiação solar de um dia típico de verão aplicada a uma área de 1 m^2 seria equivalente ao peso de um único grão de areia (cerca de 0,4 microgramas).

Embora o valor teórico tenha sido obtido de forma relativamente simples para uma situação hipotética ideal, a detecção e medição direta por meio de experimentos deste tipo de força não é tarefa fácil, devido à presença de forças radiométricas. Assim, a aula segue mostrando as dificuldades enfrentadas pelos cientistas ao longo dos anos para realizar esta medição para culminar, em 1969, no experimento de Arthur Ashkin, que conseguiu demonstrar e medir a pressão de radiação utilizando microesferas de látex imersas em água.

Este é o momento mais importante da aula e está diretamente ligada ao objetivo principal deste trabalho: a partir de desenhos que representam o experimento de Ashkin, é feita uma análise sobre a ação dos raios de luz que incidem nas microesferas integrando todos os conceitos físicos apresentados até então. Isso revela, inclusive, uma força que não havia sido antecipada por Ashkin, denominada força de gradiente, responsável pelo fenômeno do pinçamento óptico. Ademais, detalhes são acentuados neste ponto como: quais as características do material das microesferas e do meio em elas foram imersas; qual foi o comportamento óptico dos raios de luz que atravessaram as microesferas; e qual o perfil de intensidade do laser utilizado por Ashkin. Por fim, apresenta-se o desenvolvimento da tecnologia de pinças ópticas ao longo dos anos até chegar nos modelos atuais, que possibilitam o aprisionamento tridimensional utilizando apenas um laser altamente focalizado.

Para verificar se o fenômeno foi compreendido, há perguntas no material didático direcionadas ao aluno. Elas envolvem situações avessas às apresentadas, isto é, um experimento mental sobre qual seria o resultado obtido por Ashkin em condição diversa à que ele realizou. Pergunta-se o que ocorreria se o meio de imersão fosse mais refringente do que a esfera; o porquê da necessidade de transparência; e o que ocorreria se as esferas estivessem no vácuo. A última pergunta remete à **aula 1**, onde os alunos puderam verificar no simulador o que ocorreria nesta situação. A capacidade de responder a estas perguntas evidencia caminho do aluno em direção a uma aprendizagem significativa.

Como dito, a **aula 4** possui uma sequência lógica bem definida a fim de conduzir os alunos para a aprendizagem significativa. A diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa ocorrem ao longo da seguinte linha de pensamento:

1º) a luz transporta energia, mas também possui momento e pode exercer força. A fraca conexão entre os subsunçores de *força* e *luz*, revisados na **aula 3**, passam a ganhar mais estabilidade com a explicação dos conceitos e as aplicações como velas solares;

2º) uma bola de bilhar carrega momento e quando colide com outra bola, empurra-a e sofre desvio. Um raio de luz é desviado ao passar por uma esfera de vidro transparente, logo, empurra a esfera. Os subsunçores relacionados à *Lei de Conservação do Momento Linear* e *Lei de Ação e Reação* passam a estabelecer conexões com o subsunçor *luz* e outros mais específicos, como *refração* e *reflexão da luz*;

3º) uma análise vetorial sobre as forças é feita, explicando o efeito de “pinça”;

4º) finalmente, as várias possibilidades de como prender uma esfera de vidro são mostradas, aumentando a estabilidade da estrutura cognitiva dos indivíduos.

4.1.5 Avaliação da aprendizagem

A **aula 5** encerra a proposta didático-pedagógica e envolve atividades avaliativas. No entanto, diferentemente do que se vê aplicados nas provas convencionais do Ensino Médio, a avaliação deste trabalho busca verificar evidências de uma aprendizagem significativa. Para tal, não se deve fazer simples questões de múltipla escolha ou perguntas associadas diretamente ao que foi visto na aula. Se assim se constituísse a avaliação, o aluno poderia buscar conceitos memorizados, obtidos de forma mecânica, e escrever respostas prontas. É importante retirar o aluno da zona de conforto e avaliar seu conhecimento de forma ampla, permitindo-lhe expor o seu entendimento por meio de sequências lógicas, diagramas hierarquizados e explicações dos fenômenos por meio de suas próprias palavras.

Neste sentido, a avaliação proposta é constituída de duas atividades para cada aluno:

1) Explicação sucinta sobre o funcionamento das pinças ópticas, segundo seu próprio entendimento, preferencialmente utilizando desenhos que apoiem o texto.

2) Construção de um mapa conceitual com os temas “Mecânica” e “Óptica” no topo. Os conceitos das áreas da física mencionadas devem ser desenvolvidos ao longo do mapa, de forma a convergirem a um tema final: pinças ópticas.

Pode ser que os alunos não saibam trabalhar com mapas conceituais. Neste caso, deve-se reservar alguns minutos da aula para ensiná-los. No material didático, o texto da **aula 5** é, em grande parte, destinado a este fim.

A primeira atividade da **aula 5** avalia, além da capacidade de síntese, o entendimento geral do aluno sobre o assunto principal. O interessante aqui é que, como há diversos fenômenos físicos envolvidos no pinçamento óptico, dificilmente o aluno escreverá algo simplesmente memorizado. Os fenômenos mencionados são apresentados na **aula 4** com uma sequência específica, de modo a construir uma estrutura sólida de conceitos físicos. O não entendimento de qualquer um destes fenômenos ou conceitos, impede que o aluno tenha a compreensão de como a microesfera é aprisionada pelo laser.

Já a segunda atividade, a construção do mapa conceitual, avalia a capacidade do aluno em organizar os significados e as ideias que ele atribuiu ao novo conhecimento. Vale ressaltar que esta forma de avaliação concorda com os princípios da diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, pois o aluno precisa construir uma linha conceitual individual sobre cada área da física envolvida no tema (mecânica e óptica) e, ao mesmo tempo, pensar em como conectá-las para chegar ao pinçamento óptico.

Percebe-se que cada uma das atividades constitui uma espécie de avaliação qualitativa da aprendizagem e, portanto, julgar a compreensão dos conceitos atribuindo uma “nota” ao aluno se torna uma tarefa difícil. Ademais, a aquisição e atribuição de significados é idiossincrática a cada aluno e, portanto, o professor deve atentar-se principalmente à coerência dos conceitos e a conexão dos mesmos à estrutura apresentada pelo aluno.

4.2 APLICAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA

O ano de 2020 foi atípico no que tange às atividades educacionais. A pandemia de Covid-19 e o fechamento das escolas forçou as mesmas a adotarem o modelo de ensino virtual durante praticamente todo o ano letivo. Por este motivo, o produto educacional foi aplicado de forma remota e síncrona utilizando o sistema de comunicação por vídeo Google Meet⁸ para a realização das aulas.

O produto educacional foi aplicado a um total de 35 alunos da terceira série do Ensino Médio de duas escolas particulares da cidade de Foz do Iguaçu, simultaneamente. As aulas de física são ministradas, em ambas as instituições, com caráter preparatório para concursos

⁸ <https://meet.google.com>

vestibulares e ENEM. Assim, sob a rigidez do cumprimento do conteúdo programático e finalização do material didático do colégio, a aplicação do produto em horário de aula mostrou-se inviável. Todas as aulas e atividades da proposta didático-pedagógica foram ministradas no contraturno, em um total de 3 dias.

Um formulário de inscrição foi feito no Formulário do Google e enviado a um total de 92 alunos para verificar o interesse para participação das aulas. Como no contraturno muitos alunos realizam atividades como cursos de idiomas e esportes, pedia-se no formulário que eles falassem qual os melhores dias e horários. A partir destas informações, foi possível preparar um horário que possibilitou a participação da maior parte dos alunos interessados.

O primeiro encontro contemplou as aulas 1 e 2, e o segundo encontro, as aulas 3 e 4. Nos dois encontros, o tempo total de aula foi de 1 hora e 40 minutos. Após um final de semana com tempo suficiente para que os alunos revisassem o conteúdo ministrado, o terceiro e último encontro contemplou a aula 5, que trata da avaliação final.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado o relato da aplicação da proposta didático-pedagógica para o Ensino Médio e os resultados obtidos. Para cada aula é realizada a descrição das atividades, pontuando a participação dos alunos. A discussão dos resultados é baseada na observação do professor, no discurso dos alunos, nas interações ocorridas durante o desenvolvimento da aula e na verificação das atividades realizadas pelos estudantes.

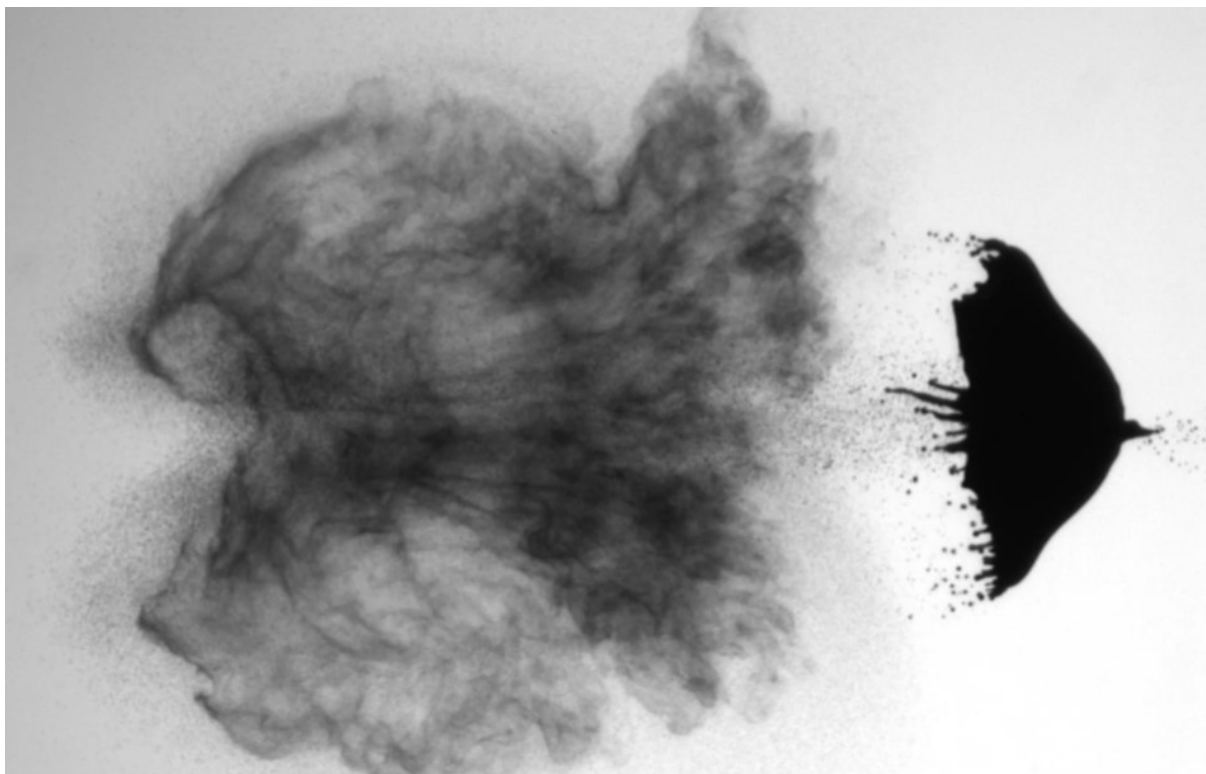
5.1 O PRIMEIRO CONTATO COM PINÇAS ÓPTICAS

Como o assunto é novidade para os alunos e está fora da grade curricular comum, a primeira aula possui o objetivo de motivar os alunos e deixá-los impactados com o tema. Por este motivo, decidiu-se que o primeiro momento deveria ser mostrando aos alunos sobre a pressão de radiação que, embora seja imperceptível no cotidiano, é muito estudada e aplicada em muitas áreas relacionadas ao desenvolvimento tecnológico e científico.

O material didático foi entregue aos alunos em formato digital (PDF) momentos antes do início da aula. A ideia era que não se antecipassem ao tema para que os vídeos, as imagens e o simulador tivessem maior impacto e causasse um maior interesse pelos assuntos que estariam por vir.

A aula começou com a explicação do histórico sobre a pressão de radiação, como Kepler propôs sua teoria pela primeira vez ao observar cometas ao redor do Sol, até os projetos de veleiros solares das agências espaciais contemporâneas. Muitos alunos demonstraram incredulidade quanto a esta interação particular entre luz e matéria. Foi apresentado, então, um vídeo denominado *Laser impact on a drop* que apresenta os efeitos de um laser altamente focalizado com direção horizontal que atinge uma gota de tinta. O instante que causou maior impacto nos alunos pode ser observado na Figura 20. Ao ver que a gota se comportou como se fosse atingida por um tiro, a interação entre radiação e matéria por meio da pressão de radiação ficou mais clara.

Figura 20 - Interação entre um laser e uma gota de tinta.



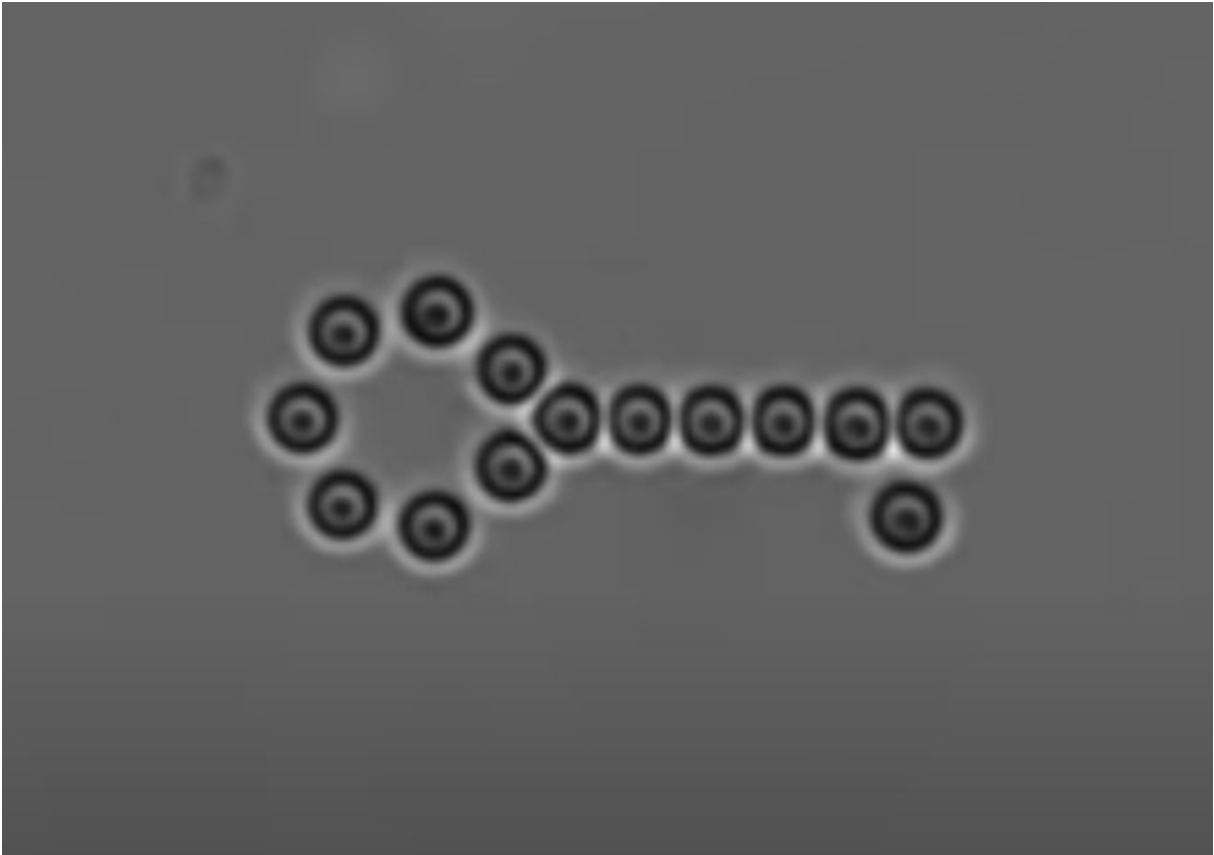
Fonte: *Gallery of Fluid Motion* da *American Physical Society*⁹.

Ao final da parte expositiva da aula as pinças ópticas foram apresentadas, mas sem envolver conceitos físicos, apenas mostrando o que são e quais suas funções dentro da área tecnológica. Para ilustrar, um vídeo chamado *Optical Tweezers in Action: Key Facts* foi apresentado. A Figura 21 mostra o instante inicial do vídeo, em que percebe-se a precisão com que microesferas de poliestireno são manipuladas formando a figura de uma chave.

Uma reflexão proposta no texto do material didático foi mencionada após o vídeo e gerou uma quantidade inesperada de comentários, a saber: “Até onde uma tecnologia de manipulação não invasiva, estéril, de alta precisão e controle remoto computadorizado pode chegar?” Os alunos começaram a conjecturar aplicações como manipulação de pequenos organismos, configuração e manipulação de nanorrobôs, cura para o câncer entre outras. A apresentação de algumas aplicações atuais como manipulação e medição de propriedades de filamentos de actina e DNA parece ter aumentado o interesse e a curiosidade dos alunos, cumprindo o objetivo inicial da aula.

⁹<https://gfm.aps.org/meetings/dfd-2014/5408ec6e69702d07711b0200#sthash.HF7veuhs.dpuf>

Figura 21 - Microesferas de um micrômetro de diâmetro sendo manipuladas por uma pinça óptica.



Fonte: Canal da Elliot Scientific Ltd. no Youtube¹⁰.

O encerramento da aula 1 se deu por meio da utilização de um simulador com um roteiro pré-definido. A ideia inicial era demonstrar os fenômenos e pedir para que os alunos anotassem suas hipóteses para discussão ao final da aula. Entretanto, notou-se que os alunos não conseguiram se conter. Assim que questionados sobre os fenômenos, eles prontamente respondiam com suas teorias. Aplicações posteriores podem levar isso em consideração, principalmente se realizadas em regime presencial, de forma que as perguntas contidas no roteiro podem ser respondidas ao passo que são feitas, reduzindo o tempo do último passo do roteiro, destinado a uma discussão para verificar as hipóteses e esclarecer as eventuais dúvidas da aula.

5.2 TESTE DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS

Para a aula 2, realizada na mesma tarde, foi entregue um questionário (virtual), montado com a ferramenta Formulários do Google, com um total de 8 questões contemplando os seguintes temas: Leis de Newton, momento linear, colisões, operações vetoriais, fenômenos

¹⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=ju6wENPtXu8>

ópticos e conceitos de física moderna. As mesmas questões encontram-se no material didático, de forma que, se a aplicação for presencial, os alunos poderão entregar estas páginas separadamente para o professor. Ademais, após a devolução os alunos poderão ter acesso às suas respostas após o término das aulas, verificando se houve avanço no entendimento dos temas cobrados.

Como dito, os alunos participantes estavam em preparação para o vestibular, de forma que resolveram as questões o mais corretamente possível e, aparentemente, sem qualquer tipo de cola. Uma vez que o teste não vale qualquer tipo de nota e as respostas não são divulgadas, as questões servem apenas dois propósitos: para o aluno, a auto-avaliação; para o professor, a noção dos conhecimentos prévios de cada aluno. Um comentário feito em uma questão aberta corrobora com esta ideia: “coloquei muito do que eu acho nesse teste nas questões dissertativas, mas não estou com medo nem nada porque é pra aprender mesmo.”

Embora tenham demonstrado avidez pelas respostas das questões, o professor não as forneceu, com o objetivo de revisitá-las em momento posterior ao término das aulas.

O resultado do teste foi curioso, pois demonstrou que a maior parte dos alunos tinha um bom domínio do conteúdo para conceitos mais simples, como as Leis de Newton e os fenômenos ópticos de reflexão, refração e absorção. Entretanto, conforme os temas ficavam mais específicos como operações vetoriais com eixos ortogonais angulados em relação ao plano cartesiano, e conservação do momento linear em colisões, uma maior dificuldade foi verificada. A questão que gerou uma grande quantidade de respostas quase idênticas foi a última, de caráter dissertativo, a saber, “O que você entende por “fótons”?”, e o resultado foi que 26 dos 35 alunos (74%) os relacionaram a “partículas” ou “pacotes” de energia que compõe a luz. O restante utilizou termos como “reações que liberam energia”, “moléculas” e até “força” relacionados à luz.

Finalmente, notou-se que, embora os alunos não tivessem passado, até o momento, por aulas de Física Moderna no colégio, a ausência completa de subsunçores não seria um problema. Uma conversa posterior com os alunos revelou que muitos acompanham canais de ciência no YouTube e, portanto, já tinham ouvido falar sobre Física Quântica e Teoria da Relatividade, embora não tivessem se aprofundado no tema.

O teste de conhecimentos prévios cumpriu seu objetivo principal de fornecer ao professor sobre as concepções e significados que os alunos tinham em relação aos temas que seriam abordados ao longo das aulas.

5.3 REVISÃO DOS CONCEITOS DE MECÂNICA, ÓPTICA E FÍSICA MODERNA

As aulas 3 e 4 foram expositivas, com a utilização de slides, permitindo a visualização de imagens. A parte de mecânica foi abordada de forma diferente da convencional do Ensino Médio. A saber, todas as Leis de Newton foram associadas ao conceito de quantidade de movimento. Em geral, estes temas são trabalhados em momentos muito diferentes, um no início do ano e o outro no final. Desta maneira, mesmo que as respostas do teste de conhecimentos prévios tenham demonstrado domínio dos conceitos básicos de mecânica, a aula transcorreu com participação significativa, com vários comentários e pedidos de exemplos. A explicação clara sobre como deduzir a expressão $\vec{F}_R = m \vec{a}$ a partir de $\vec{F}_R = \Delta\vec{p}/\Delta t$ mostrou-se efetiva para a melhor compreensão dos alunos.

Não houve dúvidas, comentários ou apontamentos durante grande parte da aula. Cálculos com vetores e os fenômenos de reflexão e refração mostraram-se conceitos já dominados pela maioria dos alunos, como verificado no teste de conhecimentos prévios. Entretanto, quando os tópicos de Física Moderna e Contemporânea apareceram, os alunos voltaram a participar ativamente com muitas perguntas e comentários. Embora fosse a parte da aula com menor quantidade de conteúdo, foi a que durou mais tempo, uma vez que conceitos como quantização de energia, dualidade onda-partícula, fótons e momento linear da luz são mais complexos e exigem um nível maior de abstração. Uma aluna fez um comentário que chamou a atenção: “Vim participar das aulas por pura curiosidade, mas agora estou questionando a vida/natureza.”

O conceito envolvendo natureza da luz é novidade para muitos alunos. Embora faça parte da grade curricular um breve histórico das teorias acerca da natureza da luz, os alunos apresentaram certa dificuldade em associar esta dualidade à sua própria realidade.

5.4 O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS PINÇAS ÓPTICAS

Dando sequência à apresentação, os conceitos abordados ao final da aula 3 serviram de base para explicar sobre a pressão de radiação, início a aula 4. Embora tenham aceitado o fenômeno da pressão de radiação na aula 1, os alunos mostraram dificuldade para compreender o fato de que a luz possui momento sem possuir massa. Mostrou-se então, que o momento linear de uma radiação possui dependência de sua energia pela equação $E = pc$. Ainda assim, questionamentos sobre a não percepção destes fenômenos no dia a dia foram surgindo como era previsto e, para criar a noção de que esta força é extremamente pequena para ser percebida

facilmente, realizou-se uma estimativa da força que a radiação pode exercer em um objeto. Convenientemente, um aluno questionou: “Existe uma balança que consiga medir essa pressão de radiação?” Comentou-se que o problema de comprová-la experimentalmente estava na dificuldade em eliminar as forças radiométricas.

Encaminhando-se para o ápice da sequência didática, foi exposto como Ashkin driblou os problemas encontrados na época e, aliado à medida da pressão de radiação, descobriu uma força não prevista que tendia a puxar as partículas para o centro do feixe laser. Antes de explicar os princípios físicos envolvidos no fenômeno, comentou-se sobre alguns aspectos importantes de um feixe laser. O perfil gaussiano do laser, embora fosse uma informação completamente nova à turma, não gerou qualquer questionamento.

O *chat* voltou a ficar agitado quando demonstrou-se a força que surgia após a refração de um raio de luz no interior de uma esfera de material transparente. Um fato curioso: os alunos tiveram facilidade para compreender a pressão de radiação enquanto uma força que empurra, como no caso da reflexão dos raios de luz em um espelho, mas demonstraram maior dificuldade de compreensão à força óptica que surgiu após o desvio da luz causado pela refração. Foi necessário retomar os conceitos da 2ª Lei de Newton, lembrando exemplos como bolas de bilhar desviadas pelo impacto. Apontando a variação no momento linear da luz, os alunos relataram um melhor entendimento.

Para verificar se os alunos estavam realmente conectando o que estava sendo apresentado com a teoria previamente aplicada, foi lançado um questionamento: “O que ocorreria se o meio utilizado por Ashkin possuísse maior índice de refração do que as esferas?” Surpreendentemente, todas as respostas obtidas foram corretas. Todos seguiram a mesma linha de raciocínio deste comentário, feito por um dos alunos: “Teoricamente, o raio desviaria pro outro lado. Então, pela lógica, as esferas seriam jogadas para fora do laser, certo?”

Para encerrar a teoria sobre o pinçamento óptico, outras duas perguntas foram feitas. A ideia era dar um tempo para que elaborassem uma resposta, mas na aplicação remota não foi possível. O *chat* logo ficou cheio de mensagens. As perguntas, presentes no material didático, questionam sobre o porquê das esferas serem transparentes e o que ocorreria se as mesmas estivessem no vácuo. A primeira pergunta foi respondida por duas vias, ambas corretas: a) a baixa absorção de radiação do material transparente das esferas usadas por Ashkin reduziu significativamente a influência das forças radiométricas e, além disso, o material transparente permite a ocorrência do fenômeno da refração, que desvia os raios de luz, permitindo o surgimento da força de gradiente. Para responder à segunda pergunta, muitos disseram lembrar do simulador utilizado na aula 1, que permitiu visualizar esta situação. Entretanto, apenas dois

alunos escreveram sobre a força de atrito ou arrasto que o meio exerce sobre a esfera devido ao movimento.

Uma vez explicado o surgimento das forças, os tipos de pinças ópticas criadas a partir deste efeito foram apresentadas. O modelo 2-BEAM-TRAP e o experimento de levitação de partículas utilizando o laser mostrou-se intuitivo para muitos. As únicas dúvidas que surgiram não estavam relacionadas às forças ópticas em si, mas à dificuldade em enxergar a tridimensionalidade em uma figura bidimensional. Finalmente, apresentou-se o modelo de pinça óptica que utiliza um único feixe laser altamente focalizado, modelo utilizado nos dias de hoje. Embora fosse o modelo mais complexo, não houve questionamentos. O professor insistiu em perguntas, ao que um aluno respondeu: “os raios de luz da figura deixam mais fácil de entender. Acho que quem entendeu aquela parte da ‘força na refração’, também entendeu este modelo aí”.

Finalmente, a aula encerrou com comentários sobre o perigo de queimar amostras pela incidência do laser e, decorrente disso, a dificuldade em encontrar um laser adequado para realizar o pinçamento óptico. Um gráfico de absorvância por comprimento de onda da radiação foi utilizado para ilustrar a situação, mostrando que cada substância possui maior absorção em determinado comprimento de onda e menor em outro.

Antes de sair da sala virtual, os alunos fizeram comentários interessantes. Especulavam sobre possibilidades de utilização de versões futuras desta tecnologia no corpo humano, com objetivo de curar patologias causadas por vírus e bactérias, ou até mesmo manipular células cancerosas.

5.5 A AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM

A aula 5 foi realizada na semana seguinte à das aulas anteriores. O objetivo era permitir aos alunos que revisassem o material didático fornecido com mais calma, comparando-o com suas anotações e, se necessário, retomando conceitos que poderiam não ter sido completamente compreendidos.

A última aula começou com uma breve explicação sobre a teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e a importância de se realizar uma avaliação. Em seguida, as atividades avaliativas foram expostas.

A primeira questão pedia que os alunos escolhessem um modelo de pinça óptica e descrevessem seu princípio de funcionamento por meio de textos, diagramas e figuras. Os alunos gostaram da ideia de poder desenhar para resolver a questão.

A segunda questão solicitava que construíssem um mapa conceitual, de forma que os conceitos do topo, Mecânica e Óptica, convergissem ao longo do mapa para “Pinças Ópticas”. O objetivo era ver quais as conexões que os alunos haviam feito entre os dois tópicos principais, abordados separadamente no Ensino Médio. Os alunos conheciam mapas mentais e estavam acostumados a fazê-los, mas o mapa conceitual se mostrou como novidade e foi necessário ensiná-los a construir um.

O mapa conceitual lhes foi apresentado não apenas como instrumento avaliativo, mas como ferramenta de estudo. O caráter hierárquico do mapa conceitual ajuda a organizar ideias e conceitos que podem estar dispersos na mente do estudante. Utilizou-se o site LucidChart¹¹ para uma breve explicação sobre como construir mapas conceituais por ser gratuito e de cadastro rápido. Mesmo assim, foi permitido aos estudantes criar seus mapas à mão e enviar a foto ao professor. Um grupo de alunos comentou que a ferramenta era “incrível” e que “gostaria de tê-la conhecido antes”.

A aula 5 durou o dobro do previsto, 1 hora e 40 minutos. A demora decorreu da falta de costume por parte dos alunos em construir mapas conceituais. Por isso, pelo menos metade dos alunos ficou até o fim para conseguir finalizá-lo.

5.5.1 Comentário às respostas da questão 1

Os textos foram reveladores e demonstraram que os alunos compreenderam de forma geral o significado dos fenômenos, mas algumas lacunas teóricas ainda estavam presentes. Frases como “a luz sofreu a ação de uma força” ou “o impacto da luz na superfície” foram comuns. Além disso, muitos dos conceitos novos envolvendo Física Moderna e até mesmo o histórico da pressão de radiação sofreram certas distorções.

Entretanto, o objetivo principal foi atingido. Na grande maioria das respostas, os alunos conseguiram, com suas próprias palavras, relacionar o desvio da luz com o surgimento das forças ópticas e o perfil gaussiano do laser com a força de gradiente.

Como as explicações ficaram, em geral, muito extensas, alguns recortes das respostas de alguns alunos são mostrados a seguir.

Um dos alunos resolveu explicar o modelo 2-BEAM-TRAP, e escreveu:

“Um dos modelos de Pinça Óptica é a chamada 2-beam-trap, que consiste, basicamente em utilizar duas pinças, cada uma equipada com as mesmas características. Ao se deslocar para

¹¹ <https://www.lucidchart.com/pages/pt>

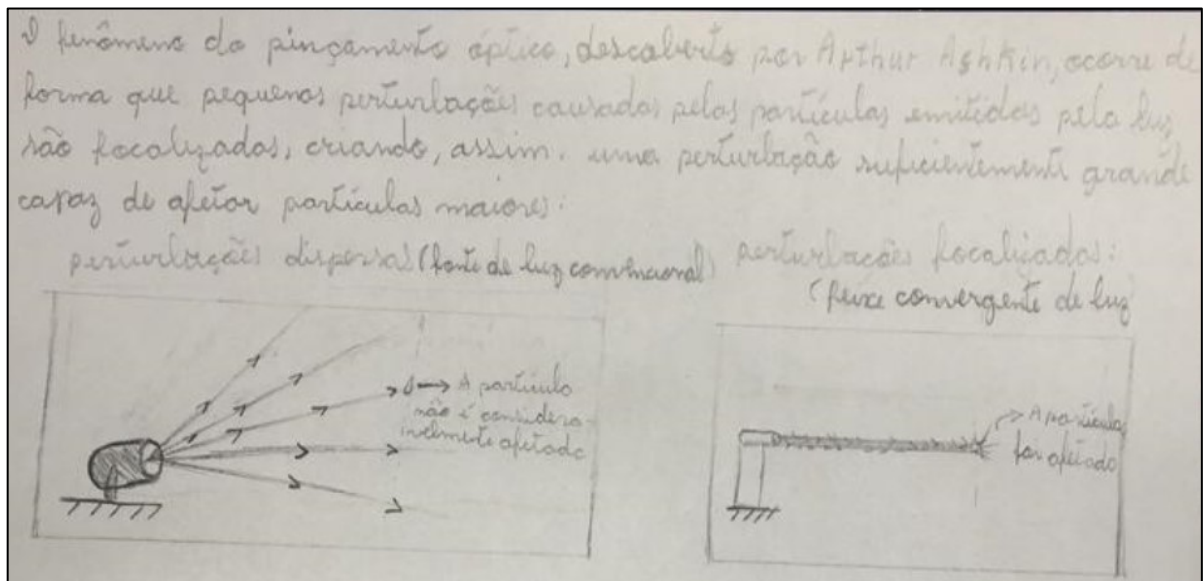
o centro do feixe, o objeto se estabiliza, e passa a sofrer somente a ação do impacto da luz, que sempre o direciona no mesmo sentido do laser; fazendo uso de duas pinças idênticas, pode-se anular o movimento desse objeto graças a uma força de sentido contrário e mesma intensidade que aja no mesmo corpo, o que se evidencia na Lei da Inércia. Neste contexto, como a soma de ambas as forças é nula, o corpo mantém-se em equilíbrio e, portanto, estático.”

A explicação de outro aluno envolveu o conceito de pinçamento óptico de uma forma geral:

“Quando os feixes do laser penetram num objeto, sofrem refração; ao sofrerem refração, o feixe é desviado, segundo a Lei de Snell; o impacto desse feixe gera uma força com sentido “para baixo e para a diagonal” e por conta da alteração do momento linear dos fótons, segundo o Princípio Fundamental da Dinâmica e da Lei da Ação e Reação, ambas permitindo a conservação do momento do sistema e, por consequência, da luz, deve surgir uma força oposta a essa. A tendência dos objetos é de irem em direção ao centro do feixe, isso por causa do perfil gaussiano do laser: quanto mais próximo do centro, mais intenso é o feixe; quanto mais intenso é o feixe, maior será a força exercida por ele; conseqüentemente, maior será a força de reação, logo, maior será a força que puxa a esfera, levando-a ao centro. Assim ocorre o fenômeno do pinçamento óptico em seu conceito mais básico.”

O texto e as ilustrações do recorte da Figura 22 referem-se ao vídeo mostrado na aula 1, que mostra um raio de luz focalizado atingindo uma gota de tinta. Notam-se as palavras “partículas emitidas pela luz” como referência aos fótons. O aluno claramente demonstrou sua interpretação quanto à pressão de radiação, mostrando que esta é muito maior para feixes de luz focalizados do que para fontes convencionais puntiformes.

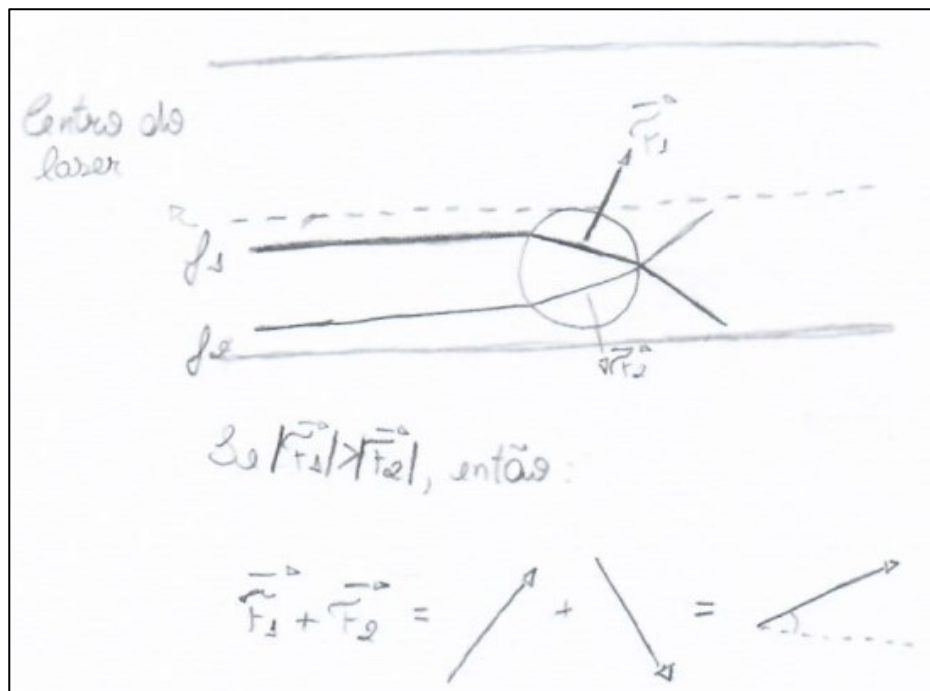
Figura 22 - Resposta à questão 1 (a).



Fonte: Respostas das questões enviadas pelos alunos e organizadas pelo autor.

O recorte da Figura 23 traz um significado interessante: o aluno ilustrou uma “soma vetorial” de forma diversa à mostrada em aula ou à que pode ser encontrada no material didático. Ainda assim, demonstra que compreendeu a direção da força resultante, que tanto empurra a esfera para frente quanto a puxa para o centro do feixe.

Figura 23 – Resposta à questão 1 (b).



Fonte: Respostas das questões enviadas pelos alunos e organizadas pelo autor.

O que provou-se uma completa novidade a todos foi o fato de que a luz, como qualquer radiação, pode exercer pressão. Decorre disso que o surgimento das forças ópticas de gradiente

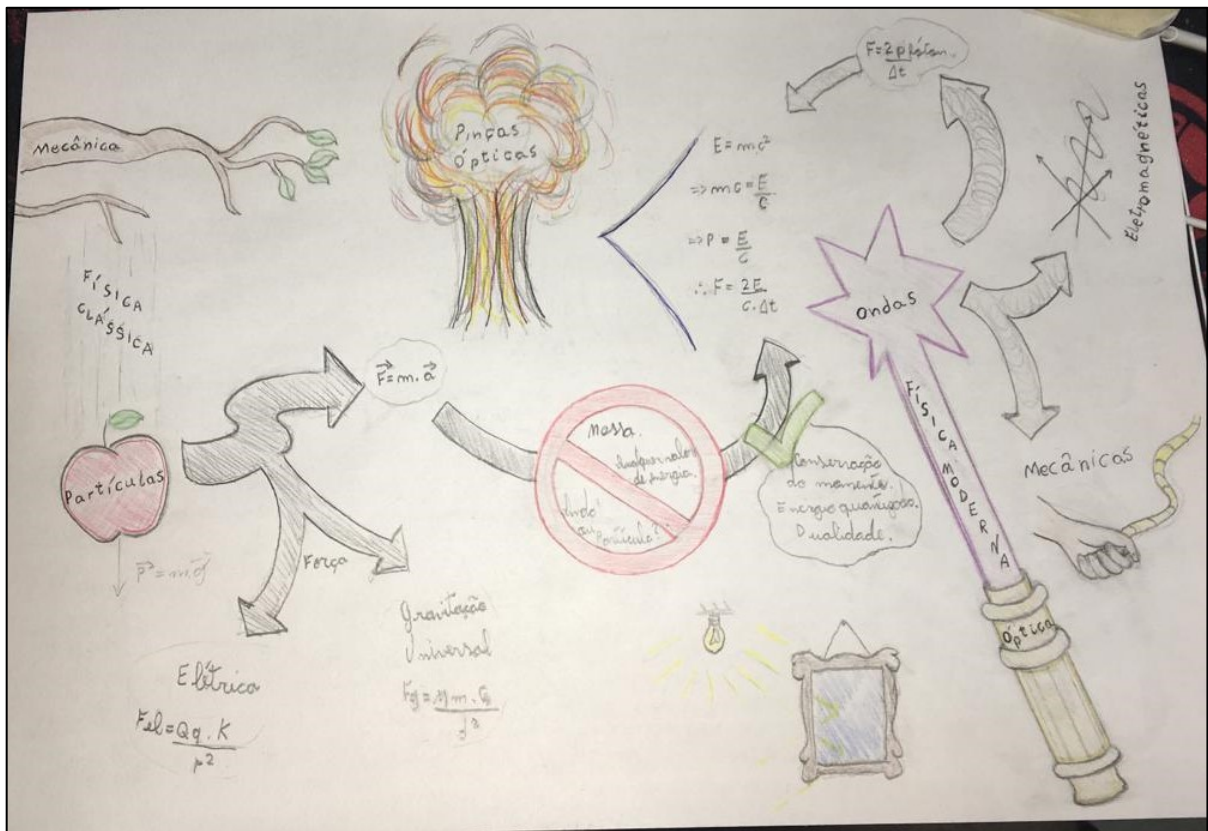
e espalhamento gerou muitas dúvidas, uma vez que os efeitos de uma reflexão eram associados de forma diferente quando se referiam ao raio luz do que quando se referiam à superfície ou à esfera. Por estarem acostumados a lidar com situações-problema na área de momento linear envolvendo apenas pontos materiais, é possível que a estrutura cognitiva dos alunos esteja organizada de tal forma que o aluno tenha uma visão “corpuscular” destes fenômenos. Associar desvios de raios de luz às Leis de Newton causou certo desconforto, pois a luz não possui massa inercial e, sendo assim, não pode sofrer ação de uma força. Nesse sentido, surgia a dúvida: “Como pode a luz exercer pressão, se não é possível exercer força sobre ela?” Enquanto o efeito da reflexão na superfície é tratado como uma pressão de radiação, o efeito da reflexão nos fótons é tratado como uma conservação do momento linear. A explicação, embora esteja de acordo com a teoria, não é de fácil assimilação.

Notou-se que alguns alunos reproduziram exatamente o texto do material didático, e desenharam as mesmas figuras (inclusive com as mesmas cores). O caráter virtual da aplicação impede que o professor tenha certeza de que a avaliação foi feita sem nenhum tipo de consulta. Assim, as avaliações que se mostraram com falta de originalidade, ou seja, cópias do material didático, não foram consideradas. Apenas respostas e mapas com palavras evidentemente próprias foram consideradas e apresentadas.

5.5.2 Comentários às respostas da questão 2

Muitos alunos não conseguiram diferenciar um mapa mental de um mapa conceitual e acabaram entregando um modelo do primeiro. Como pode ser observado na Figura 24, os conceitos foram conectados de forma criativa, mas sem hierarquia.

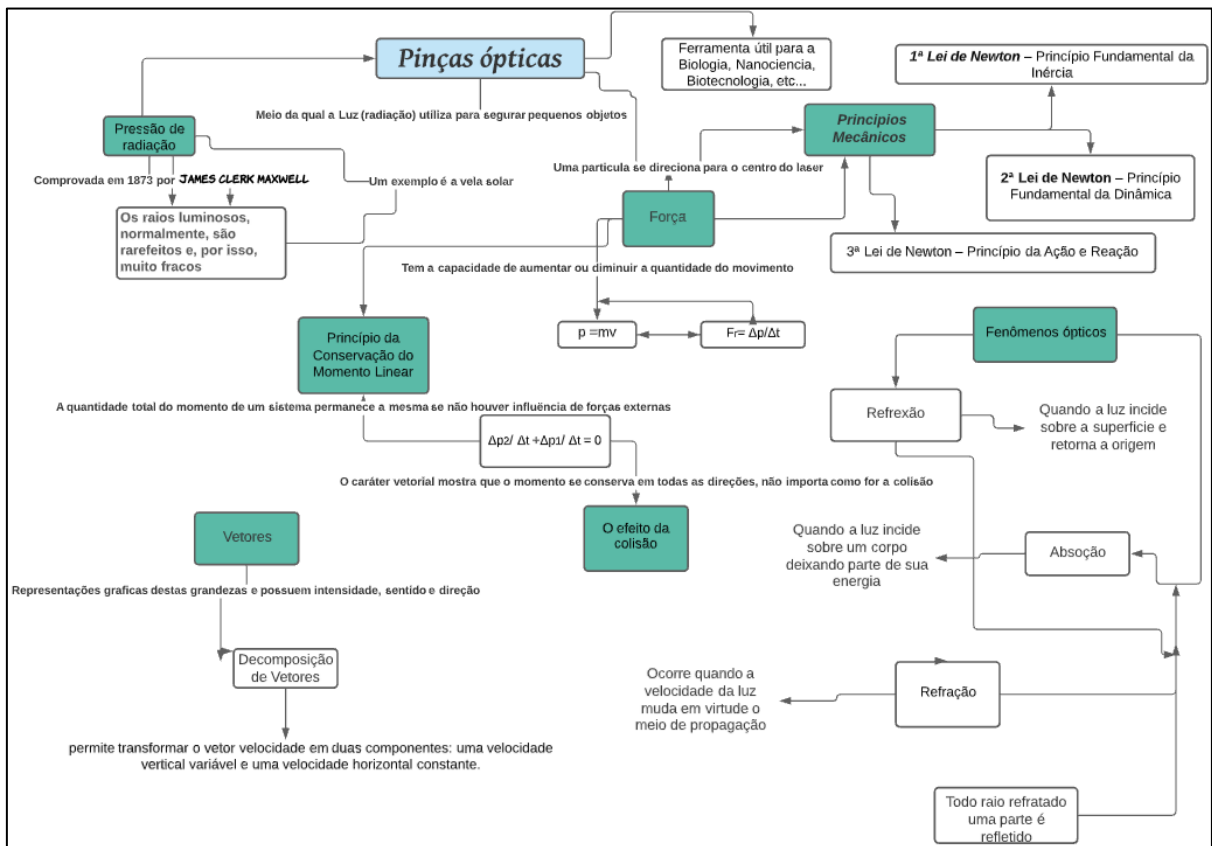
Figura 24 – Resposta à atividade 2 (a).



Fonte: Respostas das questões enviadas pelos alunos e organizadas pelo autor.

Ainda com as raízes em mapas mentais, o que pode ser observado na Figura 25 é de uma aparência mais próxima a um mapa conceitual. Entretanto, não podemos caracterizá-lo desta forma pois a hierarquia não está bem definida.

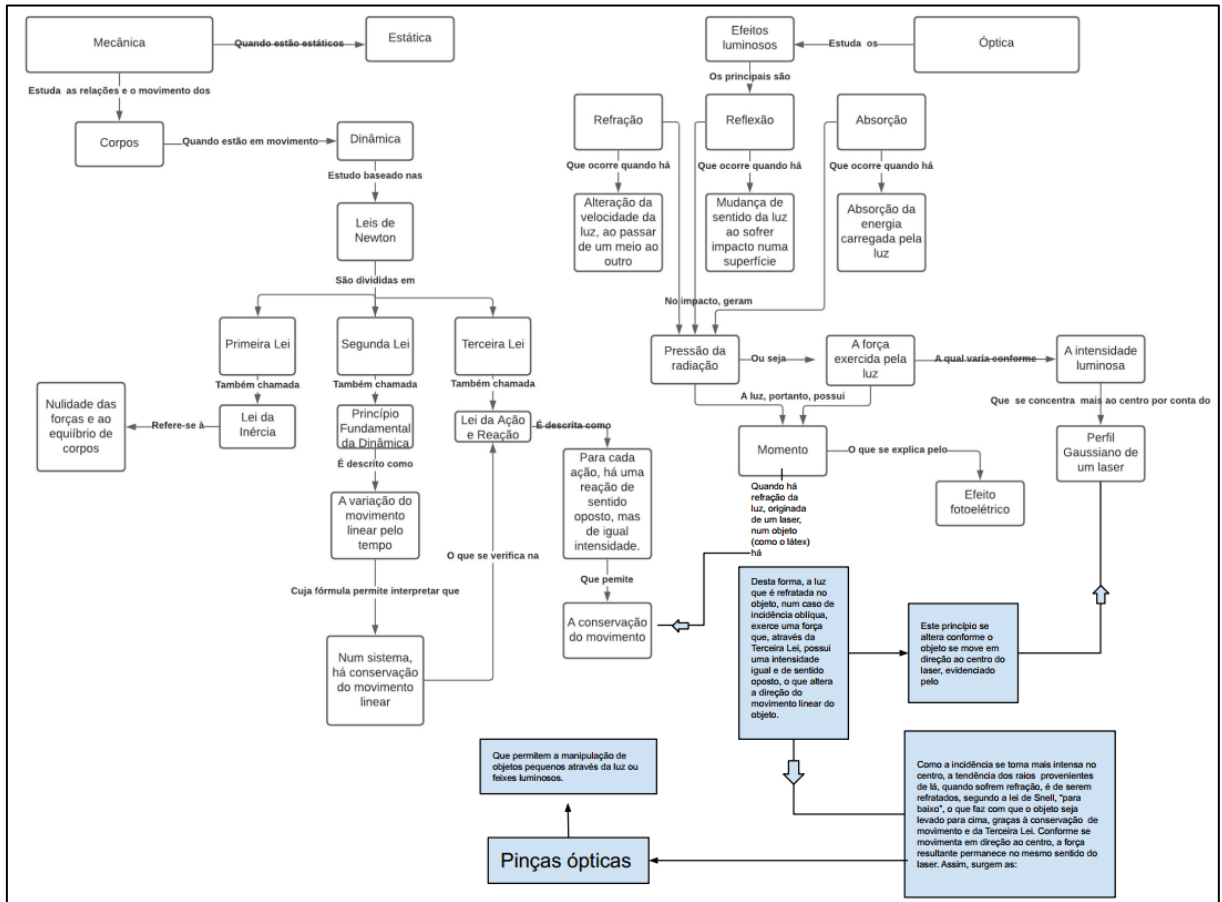
Figura 25 - Resposta à atividade 2 (b).



Fonte: Respostas das questões enviadas pelos alunos e organizadas pelo autor.

Por acharem o assunto muito complexo, alguns acabaram colocando muitas frases no mapa, deixando-o um pouco poluído, mas com riqueza de informações, como pode ser observado na Figura 26. Uma vez que o assunto é novidade para os alunos, é compreensível a dificuldade em selecionar e sintetizar os aspectos mais relevantes do conteúdo.

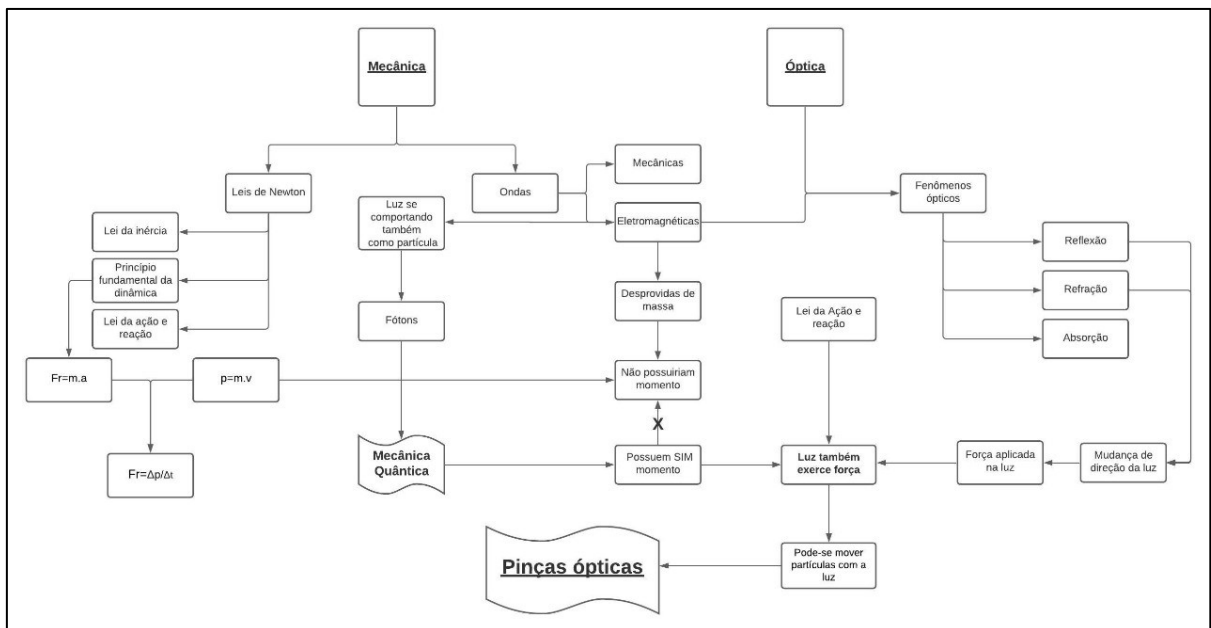
Figura 26 - Resposta à atividade 2 (c).



Fonte: Respostas das questões enviadas pelos alunos e organizadas pelo autor.

A Figura 27 mostra o exemplo de um mapa conceitual simples que atingiu o objetivo proposto.

Figura 27 - Resposta à atividade 2 (d).



Fonte: Respostas das questões enviadas pelos alunos e organizadas pelo autor.

O mapa conceitual foi entregue exclusivamente ao professor e foi montado individualmente por cada aluno devido à particularidade de uma aplicação remota. Entretanto, para aplicação em sala de aula, os alunos podem formar grupos para construir os mapas e, depois de prontos, compartilhá-los entre si. Segundo Moreira (2012a), o mapa conceitual é um instrumento muito interessante para ser compartilhado entre os alunos, pois não é (e não deve ser) auto-explicativo. Assim, durante a interação entre os grupos, os alunos certamente perguntarão o porquê dos conceitos e ligações utilizados pelos criadores de cada mapa. Dessa forma, a visão do assunto é apresentada de diversas formas, contribuindo para uma melhor diferenciação e estabilidade da estrutura cognitiva dos alunos associada àquele assunto. O resultado esperado é um caminho mais claro e eficiente em direção à aprendizagem significativa.

O material didático produzido é completo em termos teóricos, tanto para o professor quanto para o aluno, possuindo vídeos e imagens que auxiliam na interpretação do conteúdo. Sendo assim, não há limitação para aplicá-lo em qualquer escola, seja da rede de ensino pública ou particular. Ajustes pode ser feitos, provavelmente na quantidade de aulas, mas dependendo do tempo hábil para aplicação do produto, inserir esses tópicos de Física Moderna e Contemporânea ao final do conteúdo de Óptica pode instigar o interesse dos alunos, auxiliando na aprendizagem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado uma proposta didático-pedagógica para ensinar os princípios de funcionamento das pinças ópticas com base na teoria da aprendizagem significativa. Um material didático em forma de manual do professor e material do aluno, composto por uma sequência de aulas, roteiro para uso de simulador, sugestões de vídeos, sites e imagens foi desenvolvido. Buscou-se instigar a curiosidade dos alunos e unificar os conceitos de Física Clássica ensinados no Ensino Médio com tópicos de Física Moderna e Contemporânea para possibilitar a compreensão do funcionamento de novas tecnologias.

O fato do aprisionamento óptico ser explicado com conceitos físicos como a conservação da quantidade de movimento, a refração da luz e a pressão de radiação, levou o autor a seguir uma linha cognitivista, que leva em consideração os processos e conexões mentais que cada aluno desenvolve internamente. Assim, as etapas da proposta foram organizadas e aplicadas segundo a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel: verificação da predisposição dos alunos, avaliação de conhecimento prévios e sequência de aulas baseada nos conceitos de diferenciação progressiva e reconciliação integradora.

O produto educacional foi aplicado para alunos da 3ª série do Ensino Médio, em cinco aulas. Os colégios onde o produto foi aplicado possuem um sistema de ensino bienal, isto é, todo o conteúdo de Física do Ensino Médio é projetado para ser concluído até o final da 2ª série. Desta forma, na 3ª série o conteúdo é revisado por inteiro, com mais aprofundamento. Como o produto foi aplicado ao final do ano, a maioria dos temas haviam sido estudados recentemente e o número de aulas proposto mostrou-se suficiente para os alunos que participaram. No entanto, se os alunos demonstrarem falta de conhecimento em temas como momento linear, colisões ou refração da luz, sugere-se que o número de aulas seja estendido.

A avaliação da aprendizagem foi realizada de forma qualitativa por meio de duas atividades realizadas pelos alunos: (a) explicação do funcionamento das pinças ópticas a partir elaboração de um texto com palavras e significados próprios, podendo utilizar-se de diagramas e figuras como apoio; (b) elaboração de um mapa conceitual, cujo objetivo foi conectar as diferentes áreas da Física ao fenômeno do pinçamento óptico. As atividades, elaboradas individualmente, mostraram indícios de uma aprendizagem significativa.

Uma sugestão interessante para trabalho/aplicações futuras seria unificar as áreas de Biologia e Física para contemplar os tópicos de Pinças Ópticas de forma interdisciplinar, dada sua vasta gama de aplicações em sistemas biológicos. Certamente agregaria ao conhecimento

dos alunos, inserindo-os no meio científico e mostrando-lhes que o que eles aprendem na escola serve, de fato, como base para compreender a natureza e o mundo em que vivem.

REFERÊNCIAS

- ASHKIN, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. **Physical Review Letters**, vol. 24, n. 4, 1970.
- ASHKIN, A. History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atoms, and Molecules. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, vol.6, n. 6, 2000.
- ASHKIN, A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. **Proceedings of the National Academy of Sciences of USA**, vol. 94, p. 4853-4860, 1997.
- ASHKIN, A.; DZIEDZIC, J. M. Feedback stabilization of optically levitated particles. **Applied Physics Letters**, vol. 30, p. 202-204, 1977.
- ASHKIN, A.; DZIEDZIC, J. M.; BJORKHOLM, J. E.; CHU, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. **Optics Letters**, vol. 11, n. 5, 1986.
- ASHKIN, A.; DZIEDZIC, J. M.; YAMANE, T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. **Nature**, vol. 330, 769–771, 1987.
- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva**. Lisboa: Plátano, 2000, 219p.
- BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.
- CROOKES, W. On Attraction and Repulsion Resulting from Radiation. **Philosophical Transactions Royal Society**, vol. 164, 501-527, 1874.
- ESSIAMBRE, R. J. In memory of Arthur Ashkin. **Nature Photonics**, vol. 15, 167–168, 2021.
- FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. L. **The Feynman Lectures on Physics**. Vol. I. Ed. Addison-Wesley, 2010.
- GONZALES, R. M. P. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas**. Insitituto de Física – Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- GRIER, D. G., A revolution in optical manipulation. **Nature**, vol. 424, 810–816, 2003.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- HECHT, E. **Optics**. 4.ed. San Francisco: Pearson Education, Addison Wesley, 2002.
- MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: um conceito subjacente**. Em Moreira, M.A., Caballero, M.C. e Rodríguez, M.L. (orgs.) (1997). Actas del Encuentro Internacional sobre el Aprendizaje Significativo. Burgos, España. pp. 19-44.
- MOREIRA, M. A. **Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea**. Ciclo de palestras dos 50 Anos do Instituto de Física da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, março de 2014. Disponível em <http://www.if.ufrj.br/~pef/aulas_seminarios/seminarios/2014_Moreira_DesafiosEnsinoFisica.pdf>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.

MOREIRA, M. A. **Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa**. 2012a. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/mapasport.pdf>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2020.

MOREIRA, M. A. **O que é afinal Aprendizagem significativa?** Aula Inaugural do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais, Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 23 de abril de 2020. Aceito para publicação, *Curriculum*, La Laguna, Espanha, 2012b.

MOREIRA, M. A. **Subsídios teóricos para o professor pesquisador em ensino de Ciências**. Porto Alegre, 2009.

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

NEVES, A. A. R. **Força Óptica em Pinças Ópticas: Estudo Teórico e Experimental**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física Gleb Wataghin. Campinas, São Paulo, 2006.

NUSSENZVEIG, H. M.. **Curso de Física Básica 4: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998. v. 01. 437p .

NUSSENZVEIG, H. M.. **Curso de Física Básica I: Mecânica**. Edgard blucher, São Paulo, 1981.

PENA, F. L. A. Por que, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e ideias de física moderna e contemporânea na sala de aula? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 1-2, 2006

PILATTI, L.; A. KIEFER, N. I. S. Roteiro para a elaboração de uma aula significativa. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 7, n. 1, p.1- 23, 2014. Universidade Tecnológica Federal do Parana (UTFPR).

POŽAR, T.; LALOŠ, J.; BABNIK, A.; PETKOVŠEK, R.; BETHUNE-WADDELL, M.; CHAU, K. J.; LUKASIEVICZ, G. V. B.; ASTRATH, N. G. C. Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light. **Nat Commun** 9, 3340 (2018).

NEWTON, I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural** – Livro I. Traduções de Triste Ricci, Leonardo Gregory Brunet, Sônia Terezinha Gehring e Maria Helena Curcio Célia. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (Edusp), 2016. 328 p. Título original: **Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World**.

ZANUTO, V. S. **Pressão de radiação: sobre os efeitos das forças de radiação em água**. 2015. 103 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

APÊNDICE A – Produto Educacional

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

PEDRO SCHRAMM RIBEIRO

**PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS:
UMA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO**

MEDIANEIRA

2021



PRODUTO EDUCACIONAL

PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES DAS PINÇAS ÓPTICAS: UMA PROPOSTA DIDÁTICO-PEDAGÓGICA PARA O ENSINO MÉDIO

Principles and Applications of Optical Tweezers: A Didactic-Pedagogical Proposal to High School

Pedro Schramm Ribeiro

Produto Educacional vinculado à Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo V. B. Lukasievicz

MEDIANEIRA
2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO.....	4
2 MANUAL DO PROFESSOR.....	6
Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador	
Aula 2: Teste de conhecimentos prévios	
Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos	
Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas	
Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos	
3 MATERIAL DO ALUNO.....	47
Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador	
Aula 2: Teste de conhecimentos prévios	
Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos	
Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas	
Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos	
REFERÊNCIAS.....	88

APRESENTAÇÃO

O material didático “Pinças Ópticas: Princípios Físicos e Aplicações” é um produto educacional do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Polo UTFPR Medianeira. Foi desenvolvido em duas versões, um manual para o professor e um material para o aluno. Possuem poucas diferenças, mas foram devidamente adaptados de forma que as páginas estejam coerentes e, durante a aplicação, o professor possa referenciar figuras, textos e exercícios sabendo que a página de seu manual coincide com a do material dos alunos.

O objetivo do produto é estimular o aprendizado dos alunos em tópicos de Física Moderna e Contemporânea e mostrar a eles que podem aprender sobre o desenvolvimento científico e tecnológico atual utilizando os conceitos físicos que aprendem em sala de aula.

O conteúdo do produto foi desenvolvido com a intenção de aproximar os alunos da realidade do mundo contemporâneo. Portanto, utiliza uma linguagem simples e apresenta figuras com diagramação muito parecida com as encontradas nos materiais didáticos convencionais. Além disso, todas as sugestões encontradas no manual do professor são de sites da internet com livre acesso. Os vídeos podem ser facilmente encontrados no YouTube, que é uma plataforma gratuita amplamente difundida e utilizada pelos alunos. O simulador pode ser encontrado no site da Universidade do Colorado em Boulder denominado *PhET: Interactive Simulations*, que possui versão em português do Brasil, não precisa de downloads e nem de cadastro.

Para facilitar a aplicação, as páginas do Manual do Professor e do Material do Aluno são iguais entre si, mas independentes do produto educacional. Sendo assim, a aula 1 começa na página 1 e a aula 5 termina na página 40 nas duas versões.

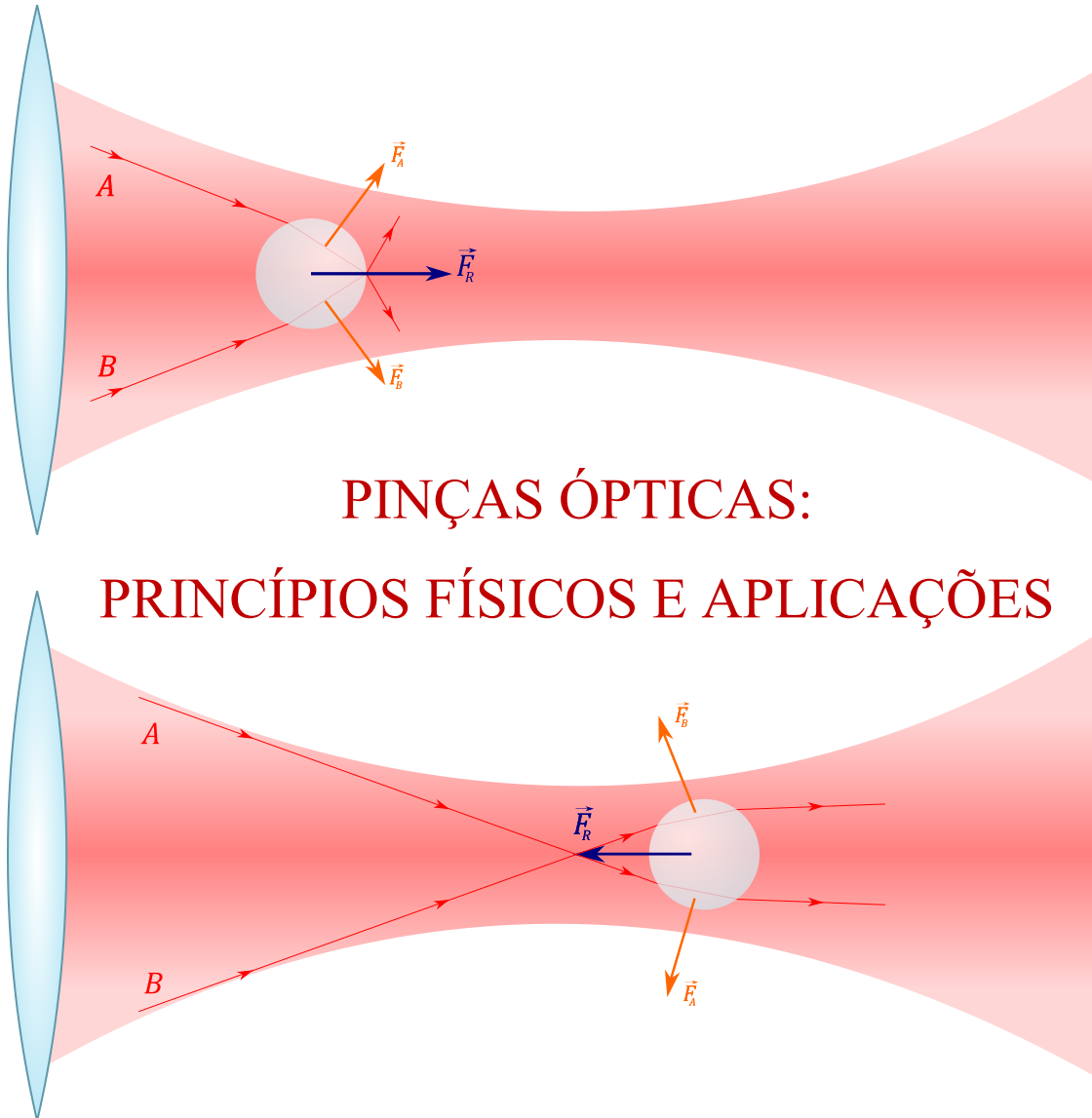
Ao professor,

Muitas das reflexões em forma de questionamento feitas ao longo do material têm respostas intuitivas, a partir de conexões lógicas apresentadas no texto teórico. O manual do professor possui todas as respostas em texto verde com fonte reduzida. Entretanto, caso queira aumentar a base de conhecimento para um debate mais aprofundado com os alunos, convido a conferir a fundamentação teórica da dissertação, que possui, em detalhes, todo o conteúdo necessário para entender o pinçamento óptico dentro dos limites da óptica geométrica.

O número total de aulas pode ser flexibilizado, dedicando mais aulas por conteúdo dependendo do grau de conhecimento dos alunos nos tópicos de Mecânica e Óptica. Isso pode ser verificado no teste de conhecimentos prévios da Aula 2. Entretanto, a sequência proposta tem um caráter mais rígido, pois foi desenvolvida utilizando os conceitos da diferenciação progressiva e reconciliação integradora, segundo a teoria da aprendizagem significativa, de David P. Ausubel. Sendo assim, a compreensão do conteúdo de cada aula subsequente depende da compreensão do conteúdo apresentado na aula anterior.

O tema Pinças Ópticas foi escolhido por estar em momento de extrema relevância científica, rendendo o prêmio Nobel de Física de 2018 a Arthur Ashkin, que descobriu a manipulação de pequenos objetos utilizando luz. Espera-se que a aplicação do produto sirva para trazer o aluno à realidade do mundo científico, talvez agora como espectador e aprendiz, mas futuramente, como participante ativo no desenvolvimento da ciência. Ao mesmo tempo, espera-se criar entusiasmo no próprio professor, que ao estudar este tema aparentemente complexo, consiga compreendê-lo com os conceitos que ensina diariamente, fascinando-se com a beleza da ciência, assim como o autor deste trabalho o fez.

MANUAL DO PROFESSOR



Autor: Pedro Schramm Ribeiro

Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador

Tendo em vista que esta aula busca motivar e aumentar o interesse dos alunos no assunto, é importante buscar um método que permita a visualização de imagens, animações e vídeos. Dessa maneira, ministrar a aula de forma expositiva somente com fala e quadro negro, com os textos e as figuras deste material didático como únicos recursos de apoio, poderá reduzir o impacto que um tema desta importância merece. Portanto, sugere-se que a aula tenha como recurso de apoio, por exemplo, slides montados com as figuras deste material e com os vídeos sugeridos ao longo do texto.

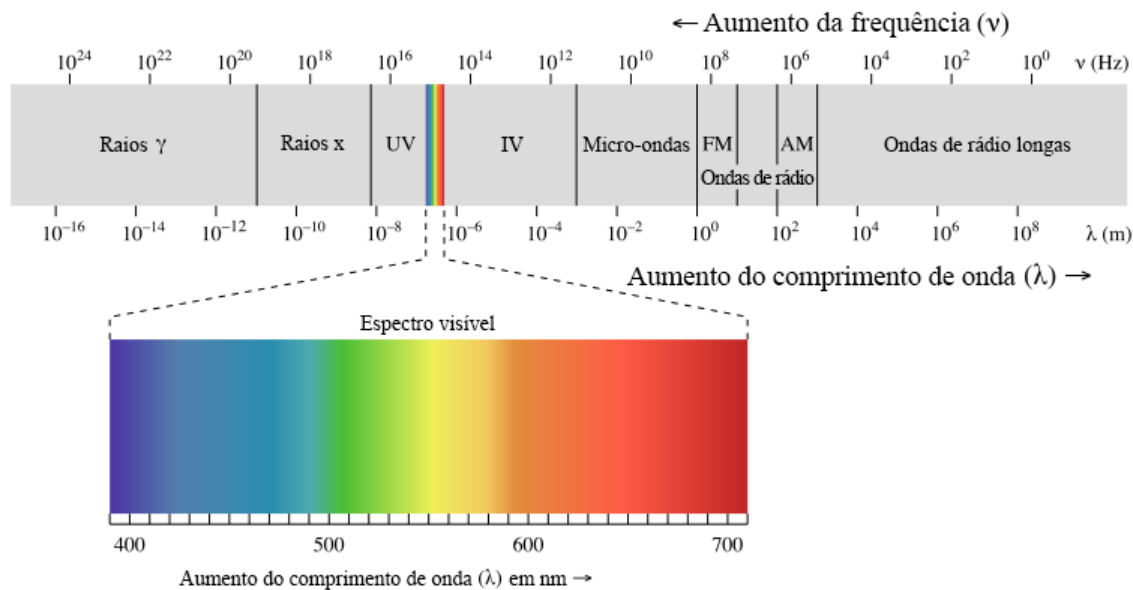
O QUE SÃO PINÇAS ÓPTICAS?

Como aprendemos durante nossa jornada no Ensino Médio, a palavra *óptica* está relacionada à luz ou radiação eletromagnética. A palavra *pinça*, por sua vez, não tem segredo: é simplesmente uma ferramenta que usamos para segurar ou puxar pequenos objetos. Nesse sentido, ao juntar as duas palavras, juntaríamos também os seus significados. Portanto, uma pinça óptica é uma ferramenta que utiliza luz para segurar, mover e aprisionar partículas. É realmente incrível, não é? Luz segurando objetos!

É importante deixar claro desde já que quando falamos de **luz**, não estamos necessariamente falando daquela que conseguimos enxergar. Lembre-se que há uma gama gigantesca de tipos de radiações que constituem o chamado **espectro eletromagnético** (Figura 1). Nós humanos só conseguimos enxergar uma pequena faixa de comprimentos de onda que chamamos de **espectro da luz visível**.

Você já deve ter percebido que qualquer tipo de radiação transporta energia. Não fosse por isso as plantas não seriam capazes de se desenvolver, uma vez que transformam a energia da luz proveniente do Sol para realizar a fotossíntese. Neste simples exemplo, temos a energia radiante sendo transformada em energia química, que é o alimento da própria planta. O que pode ser novidade para você é que a luz também pode exercer força! Esse fenômeno é chamado de **pressão de radiação**.

Figura 1 - Espectro eletromagnético.



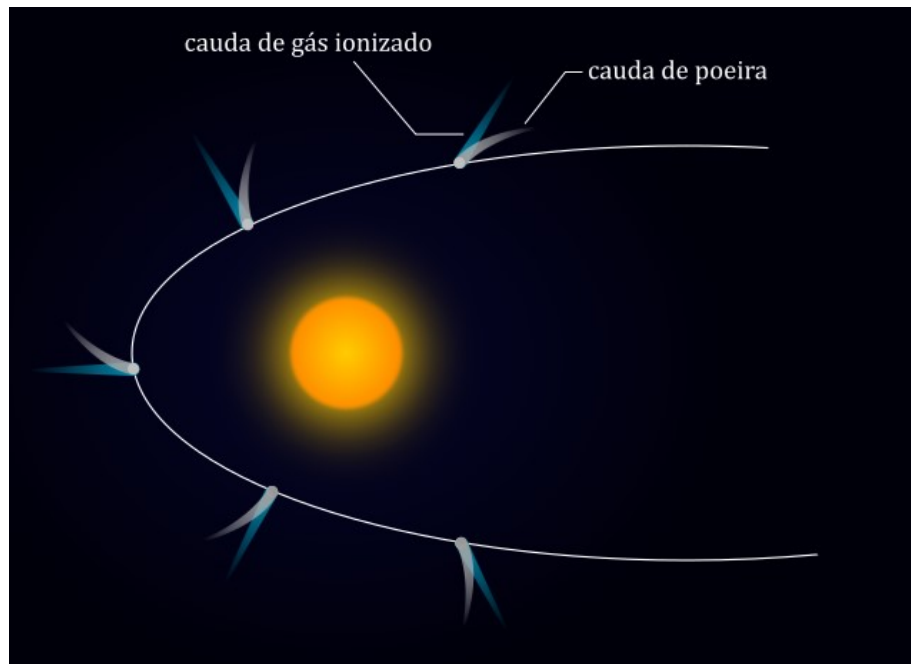
Fonte: Khan Academy¹.

Em 1619, um astrônomo alemão chamado Johannes Kepler documentou pela primeira vez essa ideia. Em seu trabalho ele relatou que, durante suas observações, percebeu que a cauda dos cometas que se aproximavam do Sol sempre apontavam em uma direção oposta à dele, como se estivessem sendo repelidas. Esta situação pode ser visualizada na Figura 2.

Kepler propôs que a radiação emitida pelo Sol exercia força sobre as partículas que constituem a cauda dos cometas e por isso elas se comportavam dessa maneira. Isso gerou muita discussão na época, mas essa previsão só foi comprovada teoricamente por James Clerk Maxwell em 1873.

¹ <https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

Figura 2 - Cometas ao redor do Sol com suas caudas sob influência da pressão de radiação.



Fonte: Próprio autor.

A ideia de que a radiação pode exercer pressão nos parece estranha, já que quando estamos expostos a luz não nos sentimos “pressionados pelos raios solares”. No máximo percebemos a energia térmica proveniente desta radiação queimando nossa pele. Tampouco sentimos uma força atuando sobre nossa pele quando apontamos um laser na direção dela. Mas calma, há uma explicação plausível para isso. Imagine um único grão de areia sobre sua pele e a pressão que ele exerce sobre ela. Pode-se estimar que essa pressão seja próxima de 1 Pa. Por sua vez, a pressão da radiação solar sobre sua pele é próximo de 0,00001 Pa. Cerca de cem mil vezes menor! Assim, por mais que essa pressão exista, a sensibilidade de nossa pele não é capaz de percebê-la.

É claro que a pressão da radiação aumenta de acordo com a intensidade da radiação. Isso quer dizer, por exemplo, que se utilizarmos uma lupa focalizar os raios solares em uma superfície, o ponto luminoso obtido exercerá uma pressão de radiação sobre essa superfície muito maior do que os raios não focalizados. Se podemos manipular a pressão da radiação dessa e de outras maneiras, podemos imaginar que as aplicações deste fenômeno são vastas, desde o mundo microscópico até o mundo macroscópico. Imagine você, ao mesmo tempo que usamos o momento da luz para “resfriar” átomos² podemos utilizá-lo também para mover naves

² Para saber mais: https://youtu.be/fAEAZaXhD_Y

espaciais com velas solares³! Na Figura 3 é possível ver uma representação de como é uma vela solar.

Figura 3 – Representação de uma vela solar (*Sunjammer*).



Fonte: Nasa⁴

Se você ainda não está convencido de que a luz pode interagir com a matéria de forma não fictícia, lhe convido a assistir o vídeo contido neste link:

https://www.youtube.com/watch?v=Oog-DZ_Kti4. Ele contém a demonstração do que ocorre quando uma gota de tinta é atingida por um laser focalizado.

Agora que você já sabe que a radiação tem interação com a matéria, vamos falar sobre a pinça óptica. Trata-se, como mencionado anteriormente, de uma ferramenta que utiliza luz para aprisionar pequenas partículas e guiá-las conforme a necessidade. Essa tecnologia possui algumas características peculiares e extremamente úteis. Por exemplo, a pinça óptica é controlada remotamente por meio de um computador. Isso garante grande precisão para aprisionar e movimentar as partículas.

Para ilustrar a tamanha precisão no ambiente microscópico, sugiro que veja o vídeo contido neste link: <https://www.youtube.com/watch?v=ju6wENPtXu8>. Ele mostra microesferas sendo manipuladas por um conjunto de pinças ópticas. Observe a tamanha precisão nos movimentos! Nos últimos segundos do vídeo as pinças são desligadas e as partículas passam a ter movimentos aleatórios.

³ São como velas de navios, mas que utilizam a pressão da radiação solar para acelerar.

⁴ https://www.nasa.gov/mission_pages/tm/solarsail/index.html.

Veja que, neste sentido, a pinça óptica se mostra extremamente útil como ferramenta para pesquisas na área de Biologia. Por exemplo, microorganismos como vírus e bactérias podem ser manipulados sem a necessidade de introduzir uma ferramenta mecânica que poderia interferir no ambiente, na medida e possivelmente até destruir a amostra. Ou seja, por ser uma técnica remota (sem contato físico), a pinça óptica é estéril, isto é, livre de impurezas ao manipular objetos biológicos. Neste momento, gostaria de lhe propor uma reflexão:

“Até onde uma tecnologia de manipulação não invasiva, estéril, de alta precisão e controle remoto computadorizado pode chegar?”

Veja algumas das várias aplicações das pinças ópticas:

- Inserir DNA's dentro de diferentes tipos de células;
- Fertilização *in vitro*;
- Medição da força de miosinas cardíacas;
- Medição do comprimento e da flexibilidade de filamentos de actina e de DNA;
- Caracterização de motores biológicos moleculares;
- Atuação no interior de células de forma não destrutiva.

Entre outros.

Professor, caso sobre tempo e ache pertinente, sugiro passar o vídeo contido no link: https://www.youtube.com/watch?v=obpWS_5A0rc. É um vídeo informativo que mostra uma pinça óptica comercial atuando em pesquisas que envolvem interações de DNA e proteínas.

Para que você tenha uma melhor visualização de como funciona a pinça óptica, vamos mexer um pouco com um simulador.

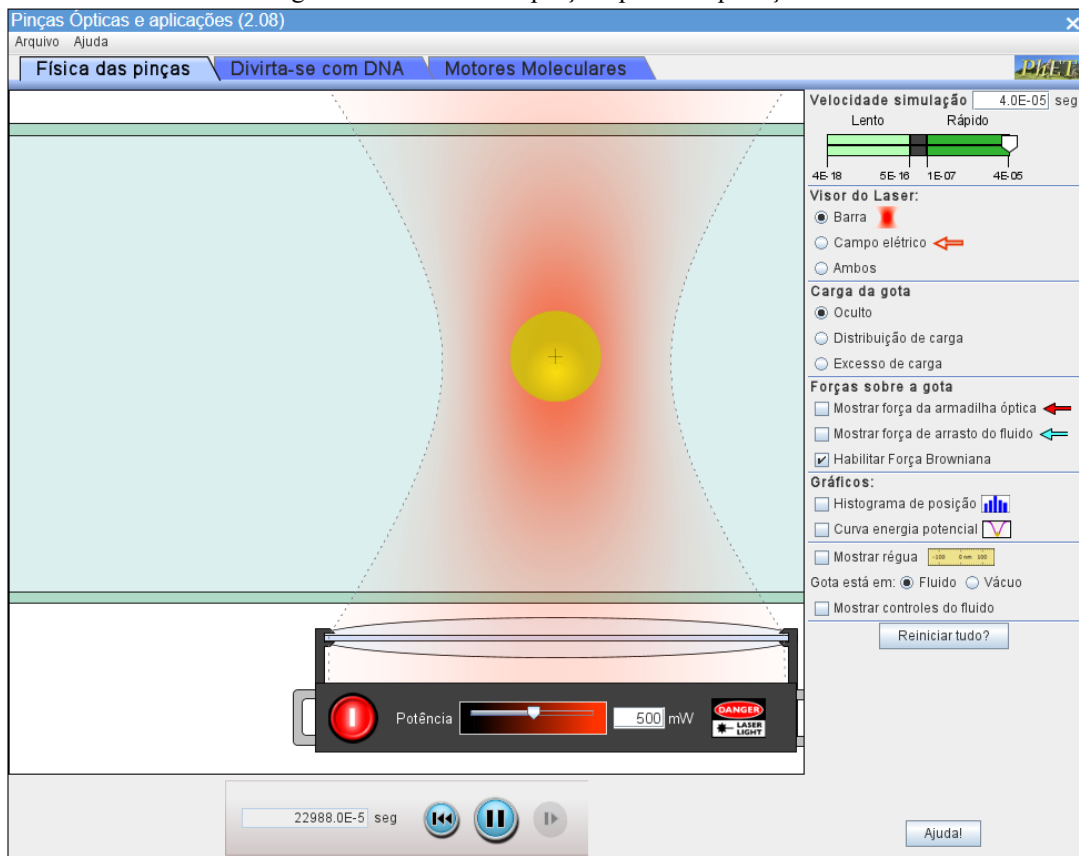
O roteiro para a utilização do simulador do Manual do Professor foi feito de forma semelhante ao Material do Aluno, mas o direcionamento do texto é diferente. Recomenda-se uma leitura prévia de ambos.

Roteiro para utilização do simulador (Manual do Professor)

É importante que os alunos anotem todas as respostas às perguntas que serão feitas, pois ao final da aula será feita uma discussão acerca dos fenômenos observados e das respostas anotadas.

1. Abra o simulador pelo site *PhET Interactive Simulations* seguindo o caminho: Simulações> Física> Pinças Ópticas e aplicações ou diretamente pelo link: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/optical-tweezers/latest/optical-tweezers.html?simulation=optical-tweezers&locale=pt_BR>

Figura 4 - Simulador de pinças ópticas e aplicações.



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.⁵

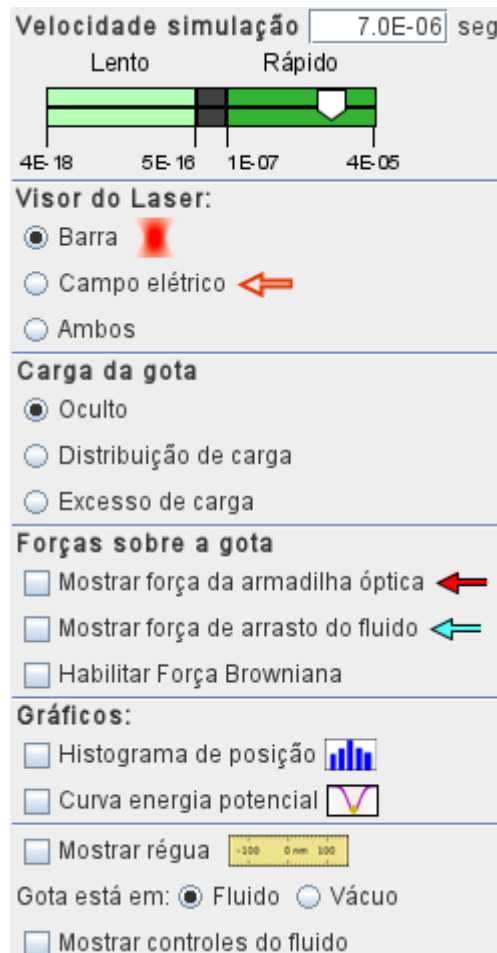
O que se vê inicialmente no simulador é uma partícula amarela, referenciada como “gota” nos controles, presa no foco de um raio laser pela força óptica. Não há qualquer

⁵ https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/optical-tweezers

influência de gravidade nesse simulador, mas há um fluido que envolve a partícula e resiste com força de arrasto a qualquer movimento.

2. Peça para que os alunos configurem os controles para uma melhor visualização. Uma boa ideia seria acessar o simulador antecipadamente nos computadores que serão utilizados e fazer testes em várias configurações, de forma a verificar qual delas permite melhor visualização dos fenômenos. A sugestão do autor deste material é a seguinte:
 - a) Velocidade Simulação: $7.0E-06$ seg
 - b) Visor do Laser: Barra
 - c) Carga da gota: Oculto
 - d) Forças sobre a gota: nenhuma

Figura 5 - Controles do simulador



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.

3. Peça para que os alunos arrastem a partícula e soltem-na em no mínimo 3 regiões diferentes: longe do laser, fora do foco do laser, no meio do laser. Os alunos devem anotar o que foi observado.

4. Os alunos agora devem ativar as opções “Mostrar força de arrasto do fluido” e “Mostrar força da armadilha óptica” em **Forças sobre a gota**. A partícula agora pode ser solta em qualquer região do simulador e a intensidade das forças deve ser observada para as várias posições iniciais. Em seguida, os alunos devem alterar a potência do laser na parte inferior do simulador, e novamente arrastar e soltar a partícula em várias posições. As seguintes perguntas devem ser feitas:

a) Em qual região a força óptica é maior?





A força óptica se mostra maior nas regiões próximas ao foco do laser, principalmente na direção radial (lateral).

b) A intensidade da força da armadilha óptica (vermelha) é sempre igual à da força de arrasto do fluido?

Essa pergunta permite explorar o conhecimento sobre força resultante. Embora o simulador não demonstre muita diferença entre as intensidades dos vetores força, se estes fossem iguais a partícula se manteria em equilíbrio e não se movimentaria em direção ao foco do laser. Assim, mesmo que a diferença seja pequena ou imperceptível no simulador, a força óptica é superior à força de arrasto ao soltar a partícula. Por este motivo, a partícula acelera em direção ao foco do laser.

c) Qual é a relação da potência do laser com a intensidade das forças observadas?

Quanto maior a potência do laser, maior a força óptica.

5. Neste momento peça para que os alunos pausam a simulação clicando em , zerem o tempo clicando em , coloquem a potência do laser no máximo (1000 mW), e abram os controles do fluido em **Mostrar controles do fluido**. Os alunos farão duas medidas de tempo: na primeira medida, a viscosidade deve possuir um valor pequeno. É sugerido o menor possível, ou seja, $5.0E-4$ Pa*sec. A partícula deve ser arrastada para qualquer região dentro do laser e fora do foco – quanto mais afastado melhor. Os alunos devem clicar em  para começar a simulação e novamente em  quando a partícula parar no foco (e as forças sumirem completamente). O tempo no mostrador deve ser anotado. Para a segunda medida, devem repetir o procedimento, mas agora para a viscosidade com um valor maior. É sugerido o valor de $2.5E-3$ Pa*sec. As seguintes perguntas deve ser feitas:

a) Como você explicaria, de forma qualitativa, o que é viscosidade?

A viscosidade é uma propriedade do fluido que descreve sua resistência ao escoamento. No caso do simulador, os alunos provavelmente a relacionarão com o atrito, ou com a dificuldade que o fluido oferece ao movimento da partícula. Assim, um líquido é mais viscoso que o ar, por exemplo.

b) Qual a relação da viscosidade do fluido com o tempo que a partícula leva para se estabilizar no foco do laser? Que explicação física você daria para isso?

Quanto maior a viscosidade do fluido, maior o tempo que a partícula leva para atingir o foco do laser. Isto ocorre pois, como dito anteriormente, a viscosidade representa a resistência que o fluido oferece ao movimento da partícula. Assim, quanto maior a viscosidade, menor a aceleração da partícula e, conseqüentemente, menor sua velocidade.

6. A última operação a ser realizada no simulador é a seguinte: peça para os alunos retirarem o fluido, isto é, devem clicar em **vácuo** na penúltima linha dos controles do simulador. Os alunos agora devem soltar a partícula em qualquer local dentro do laser. Eles devem anotar o que foi observado, bem como sua própria explicação, ou hipótese, para o que está acontecendo.

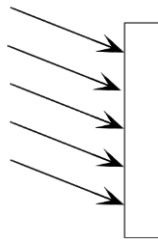
O ocorre aqui é que a partícula não consegue se estabilizar no foco laser e fica oscilando em torno do mesmo em uma espécie de movimento harmônico não amortecido. A presença do fluido produz a força de arrasto que dissipa a energia cinética adquirida pela partícula quando a força da armadilha óptica atua sobre ela. Sem ele, a energia mecânica mantém-se constante oscilando entre potencial (nos pontos mais afastados do foco) e cinética (no foco).

7. Encerradas as operações, deve-se abrir espaço para os alunos apresentarem suas respostas às perguntas feitas. Se necessário, o professor pode tirar as dúvidas remanescentes e, caso queira, comentar sobre alguns conceitos adicionais que não foram trabalhados como o movimento browniano e a curva de energia potencial.

Aula 2: Teste de conhecimentos prévios

O questionário presente no material do aluno deve ser aplicado e avaliado pelo professor. Desta forma, caso a aplicação seja presencial, sugere-se que as respostas sejam feitas em folhas separadas para serem entregues ao professor no final da aula. Em caso de aplicação remota, sugere-se que o professor monte previamente um formulário online com as questões utilizando plataformas como, por exemplo, o Formulário Google. O material do aluno possui linhas para as respostas, caso o professor queira que os alunos entreguem essas mesmas folhas ou para o caso de o aluno necessitar fazer anotações próprias após o *feedback* do professor.

1 – O desenho abaixo ilustra raios de luz paralelos que incidem sobre uma placa de material desconhecido. Explique o que acontece com os raios de luz ao atingirem a placa em três situações: (a) se o material for transparente; (b) se o material for metálico e polido; (c) o material for opaco de cor escura.



Pode ser que o aluno, sabendo que nenhum fenômeno óptico acontece individualmente, escreva sua explicação baseado em uma situação real. Assim, para cada resposta há uma observação que leva isso em consideração.

(a) **Os raios atravessam a placa sem sofrer desvio.** *Observação:* Em uma situação real, uma pequena parcela dos raios seria absorvida e outra pequena parcela seria refletida de forma que o ângulo de incidência fosse igual ao ângulo de reflexão.

(b) **Os raios refletem de forma simétrica à reta normal à superfície da placa, segundo as Leis da Reflexão.** *Observação:* Em uma situação real, mesmo espelhos polidos absorvem uma parcela da luz incidente. Isso pode ser observado quando dois espelhos estão de frente um para o outro: as múltiplas reflexões formam muitas imagens, mas quanto mais distantes essas imagens, mais escuras parecem.

(c) **Os raios são absorvidos pela superfície.** *Observação:* Nenhuma superfície real obtém 100% de absorção. Assim, uma pequena parcela dos raios são refletidos de forma simétrica à reta normal à superfície da placa.

2 – Embora seja incomum expressar a 2ª Lei de Newton em termos da variação do momento linear em materiais didáticos do Ensino Médio, essa forma é muito utilizada em cursos de Mecânica de Ensino Superior. Com algumas simplificações podemos expressar o Princípio Fundamental da Dinâmica da seguinte maneira:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Você já havia visto esta equação? Ela está de pleno acordo matemático com a equação que você conhece?

Sim.

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{\Delta(m \vec{v})}{\Delta t} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = m \vec{a}$$

O intuito desta questão é simplesmente verificar se o aluno consegue relacionar força com momento linear. Essa conexão é importantíssima para a compreensão do pinçamento óptico.

3 – Analise a situação a seguir.

Uma pessoa está tentando quebrar telhas para testar sua força como em filmes de *kung fu*. Toda vez que soca as telhas, sente dor. Depois de várias tentativas, percebe que sua mão está com hematomas e sangramento.

Se é a pessoa que está socando, ou exercendo força, sobre a telha, por que é que a mão da pessoa sofre danos? Explique utilizando conceitos físicos.

É uma questão de ação e reação (3ª Lei de Newton). A mesma força que a mão da pessoa aplica na telha, a telha aplica na mão da pessoa. Consequentemente, quanto mais forte ela socar a telha, se esta não quebrar, mais forte será a força da telha sobre o punho.

4 – Sobre o fenômeno óptico de refração assinale o que for correto:

X a) Refração é o fenômeno que ocorre quando a luz passa de um meio de propagação para outro alterando a sua velocidade.

b) Toda vez que o fenômeno de refração ocorre, a luz sofre um desvio.

Falsa. Se a incidência da luz for ortogonal à superfície de separação dos meios, não há desvio.

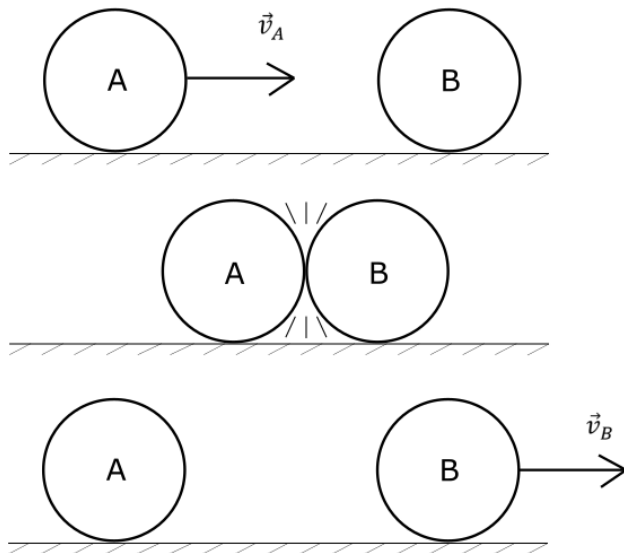
X c) A grandeza que relaciona a velocidade da luz no vácuo com a velocidade de propagação da luz em determinado meio é o índice de refração. Ele pode ser entendido como a dificuldade que um meio oferece à propagação de determinado tipo de radiação.

X d) O raio de luz aproxima-se da reta normal à superfície de separação quando passa de um meio menos refrigente para um meio mais refringente.

e) Uma lente com bordas finas tem comportamento divergente no vácuo e em qualquer outro meio no qual for imersa.

Falsa. Se a lente for imersa em um meio cujo índice de refração supera o do material do qual foi feita, o seu comportamento óptico muda. No caso, a lente viraria divergente.

5 – A figura mostra a colisão elástica (conservativa) de duas esferas A e B sobre uma superfície sem atrito. A esfera A movimenta-se com velocidade \vec{v}_A antes da colisão e a esfera B movimenta-se com velocidade \vec{v}_B após a colisão. Sobre essa situação, são feitas algumas afirmações. Assinale o que for correto.



X a) Se as massas de A e B forem iguais e a esfera A permanecer em repouso após a colisão, então $\vec{v}_A = \vec{v}_B$.

b) Durante a colisão, somente a esfera A exerce força na esfera B. Por este motivo, B começa a se movimentar enquanto A para.

Falsa. Pelo Princípio Fundamental da Ação e Reação, se A exerce força em B, esta exercerá força em A com igual intensidade e sentido oposto. De outro ponto de visto, enquanto A empurra a esfera B para frente, esta freia a esfera A com uma força para trás.

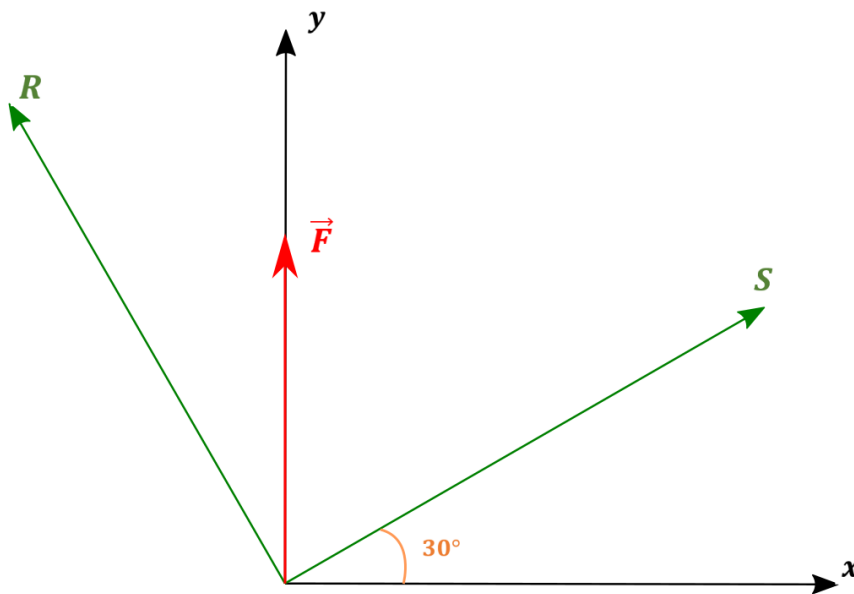
c) Se a esfera A possuir massa maior que a esfera B, ainda assim haverá conservação de energia. Entretanto, não haverá conservação de momento.

Falsa. O momento linear sempre será conservado na ausência de forças externas ao sistema.

d) Por ser uma grandeza escalar, a conservação do momento linear só ocorre em situações unidimensionais, como no exemplo dado.

Falsa. O momento linear é uma grandeza vetorial e se conserva em todas as direções na ausência de forças externas ao sistema.

6 – Em muitas situações, se faz necessária a criação de eixos cartesianos auxiliares. Provavelmente você já os viu quando resolveu problemas de plano inclinado. Na situação hipotética demonstrada pela figura abaixo, criou-se dois eixos auxiliares R e S, ortogonais entre si e com um deslocamento angular de 30° em relação aos eixos x e y. Deseja-se decompor a força vertical \vec{F} de módulo 10 N em duas componentes ortogonais \vec{F}_S e \vec{F}_R . Isso é possível? Se sim, quanto valem os módulos de \vec{F}_S e \vec{F}_R ?



A projeção de \vec{F} no eixo S é dada por:

$$|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \cdot \cos 60^\circ = |\vec{F}| \cdot \sin 30^\circ$$

$$\therefore |\vec{F}_S| = 5 \text{ N}$$

A projeção de \vec{F} no eixo R é dada por:

$$|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cdot \sin 60^\circ = |\vec{F}| \cdot \cos 30^\circ$$

$$\therefore |\vec{F}_R| = 5\sqrt{3} \text{ N}$$

7 – Sobre o campo da Mecânica, assinale a alternativa incorreta:

- a) Quanto maior a massa de um corpo maior é a sua inércia, isto é, maior a força necessária para alterar o seu estado de movimento.
- b) Dizer que um ponto material está em equilíbrio significa dizer que a resultante de forças que atuam nele é nula.
- c) A força resultante em um corpo pode sempre ser expressa por meio de vetores de força ortogonais entre si.

d) Forças de ação e reação possuem intensidades iguais e atuam no mesmo corpo.

Possuem mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos. Entretanto, atuam em corpos diferentes.

8 – O que você entende por “fótons”?

Também chamadas de partículas de luz, estão associadas ao comportamento corpuscular da radiação. Além disso, sua existência corrobora com a ideia de que a energia transportada por ondas eletromagnéticas não é contínua e sim discreta, em forma de pacotes.

Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos

Antes de aprendermos sobre a tecnologia da pinça óptica, precisamos ter certeza de que os conceitos fundamentais da mecânica e da ópticas necessários ao entendimento dessa tecnologia estejam bem consolidados em nossa cabeça. Por este motivo, teremos que fazer uma breve revisão sobre **Leis de Newton e Fenômenos Ópticos**. Mas fique tranquilo! Não faremos uma abordagem profunda sobre toda a mecânica e óptica, tal qual estão nos seus livros didáticos. Nos restringiremos apenas aos conceitos cruciais para atingirmos nosso objetivo.

Para entender como uma partícula se direciona para o centro de um feixe laser, primeiro precisamos entender o que faz os corpos se movimentarem em um ou noutro sentido. Assim, começaremos nossa fundamentação teórica entendendo alguns tópicos principais sobre **força e momento linear**.

AS LEIS DE NEWTON

Em seu famoso livro *Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, o matemático e físico Sir Isaac Newton (1643 – 1727) enunciou as leis do movimento que utilizamos até hoje⁶. Para que possamos referenciá-las mais tarde, vou colocar o enunciado dessas leis logo abaixo. Peço que leia com atenção e reflita sobre as frases:

1ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Inércia: “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.”

2ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Dinâmica: “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.”

3ª Lei de Newton – Princípio da Ação e Reação: “A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.”

⁶ Os enunciados foram retirados do livro *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I*, traduzido da obra em inglês por tradutores da Edusp – Editora da Universidade de São Paulo.

Dependendo de seus conhecimentos prévios, a compreensão dos enunciados acima pode surgir de forma intuitiva. Mesmo assim, precisamos definir um pouco mais precisamente o conceito de **força**.

Em um primeiro momento quando pensamos em força, associamos a palavra ao esforço muscular que somos capazes de fazer. Ou então, um objeto sendo puxado ou empurrado em determinada direção. Independente da definição exata do que é uma força, a relação que é importante que se faça é a seguinte: a força é capaz de alterar o estado de movimento de um corpo. Em outras palavras, um corpo que está em repouso só irá se movimentar caso uma força não nula atue sobre ele. Da mesma maneira, um corpo que se move livremente em linha reta só pode acelerar, freiar ou realizar uma curva se uma força não nula atuar sobre ele. De forma simplificada, é isso que a Lei da Inércia nos diz.

No cotidiano, observamos esse fenômeno o tempo todo. Só podemos caminhar pois a força de atrito atua sobre nossos pés. Realizar uma curva de bicicleta só é possível porque a força de atrito atua nos pneus. Um paraquedista diminui sua velocidade de queda ao abrir o paraquedas devido à força de resistência do ar. A queda dos objetos ocorre devido à força gravitacional. Em um momento você está em repouso dentro de um avião estacionado no aeroporto, e minutos depois está a mais de 500 km/h pois o assento do avião está lhe empurrando!

O principal aqui é que você reflita sobre essas situações e entenda que a força *não é necessária para a manutenção do movimento*, como foi proposto por Aristóteles e manteve-se na mente dos filósofos e cientistas durante séculos. Entretanto, a força é necessária para que esse movimento inicie ou pare, ou de uma forma menos comum, aumente ou diminua. Falando assim, parece até que o movimento de um corpo é algo que se pode medir, não é mesmo? E realmente pode! A força tem a capacidade de aumentar ou diminuir a **quantidade de movimento** de um corpo. Em termos simples, é isso que a Lei Fundamental da Dinâmica quer dizer.

A quantidade de movimento, também chamada de momento linear, é uma grandeza física vetorial, isto é, que possui direção e sentido, com um significado pouco intuitivo para a linguagem popular. Vamos discutir um pouco sobre este conceito.

Nas palavras do próprio Newton: “A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria”. Nesse sentido, entendemos que não podemos reduzir o significado de quantidade de movimento simplesmente

à velocidade, precisamos envolver a massa do corpo também. Assim, exercer uma mesma força em objetos de massas diferentes produzirá efeitos diferentes.

Pensemos em uma situação prática. O que ocorrerá se você arremessar uma esfera de 1 kg com toda a sua força e, em seguida, lançar na mesma direção uma bola de 20 kg? Você certamente perceberá que a bola mais leve moveu-se com mais facilidade, atingindo maior distância. Primeira conclusão lógica: para a mesma força (a máxima que você tem), objetos com menor massa adquirem velocidade mais facilmente. Suponha agora que um arremessador profissional com mais força que você repita exatamente o seu processo. Você verá que, para as mesmas esferas (mesmas massas), uma força maior permitiu que elas adquirissem maior velocidade. Segunda conclusão lógica: quanto maior a força, maior a velocidade adquirida pelo objeto.

Com base no que acabamos de pensar, podemos inicialmente relembrar a definição matemática de quantidade de movimento (\vec{p}), ou momento linear:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (1)$$

em que m é a massa e \vec{v} é a velocidade do corpo. Em seguida, podemos demonstrar matematicamente a 2ª Lei de Newton:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde \vec{F}_R é a força resultante que atua no objeto e Δt é o intervalo de tempo que essa força atua no objeto.

Pode ser que você olhe a Equação 2 e pense: “Ei! Eu já aprendi sobre a Lei Fundamental da Dinâmica mas nunca vi a equação da força resultante desta forma!” Se você pensou isso, é porque conhece a forma “simplificada” dessa equação. Para a maioria dos problemas de física do Ensino Médio, consideramos que a massa do objeto não muda e por isso a consideramos constante. Com essa condição aceita, podemos manipular a Equação 2 de forma a torná-la mais familiar:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{\Delta(m \vec{v})}{\Delta t} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = m \vec{a}$$

em que \vec{a} é a aceleração adquirida pelo corpo.

A força resultante apresentada na forma da Equação 2 é de grande importância para o objetivo principal destas aulas, que é aprender o princípio de funcionamento das pinças ópticas.

Mas tenha calma, permita-me fazer um esclarecimento antes que você pense que a pinça óptica aprisiona micro-partículas diminuindo ou aumentando suas massas.

O motivo pelo qual estamos tratando a 2ª Lei de Newton com a forma da Equação 2 se dá pelo fato de que estudaremos a interação de luz e matéria. Toda radiação carrega energia e momento, mas não possui essa massa inercial m tal qual conhecemos. Nesse sentido, é muito melhor que você associe força à variação de momento em vez de associá-la ao produto de massa e aceleração.

Para concluir o nosso tópico de mecânica, vamos comentar sobre o Princípio de Ação e Reação, aplicando-o a uma situação prática. De acordo com Newton, toda vez que um corpo A faz força \vec{F}_{AB} sobre um corpo B, este corpo B reage com uma força \vec{F}_{BA} sobre o corpo A. Sobre estas forças, é importante ter em mente que:

- a) Possuem mesma intensidade, ou seja, $|\vec{F}_{AB}| = |\vec{F}_{BA}|$;
- b) Possuem a mesma direção, mas sentidos opostos. Matematicamente, $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$.

Vamos explorar este princípio em uma última situação: o choque entre duas partículas e a troca de força entre elas. Para isto, pensaremos no mecanismo de um jogo que é pura física: o bilhar (Figura 6).

Figura 6 - Mesa de bilhar



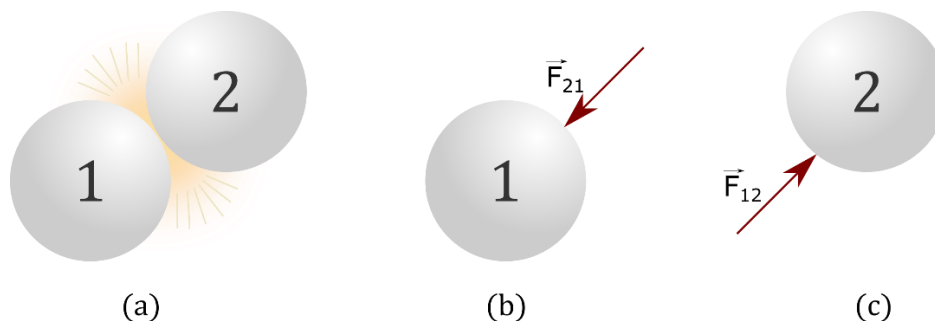
Fonte: Freepik.com

Analisaremos a situação de colisão entre duas bolas de bilhar, que chamaremos de esfera 1 e esfera 2.

Imagine que a esfera 1 colide com a esfera 2. Independentemente do estado de movimento inicial delas, sabemos que o choque promoverá trocas de forças. A reflexão é a seguinte: se a força que a esfera 1 exerce sobre a esfera 2 produz uma alteração de momento $\Delta\vec{p}_2$, então a

força que esfera 2 exerce sobre a esfera 1 produz uma variação de momento $\Delta\vec{p}_1$ no intervalo de tempo Δt que durou o choque. O esquema de forças está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - (a) Colisão entre as esferas 1 e 2; (b) força de contato na esfera 1; (c) força de contato na esfera 2



Fonte: Próprio autor.

Sendo $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ e levando em consideração que estas representam as forças resultantes que atuam nas esferas durante o choque, podemos demonstrar o que foi dito utilizando a Equação 2:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \\ \frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} &= -\frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t}\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t} = 0 \quad (3)$$

Pense por um momento: o que a Equação 3 quer nos dizer?

De forma literal: “A soma das variações de momento linear das esferas 1 e 2 no mesmo intervalo de tempo é igual a zero.” Isso quer dizer que qualquer variação no momento linear da esfera 1 causado pela colisão implicará em uma igual variação no momento linear da esfera 2, mas em sentido contrário, de forma que a quantidade de movimento total do sistema continue a mesma de antes da colisão.

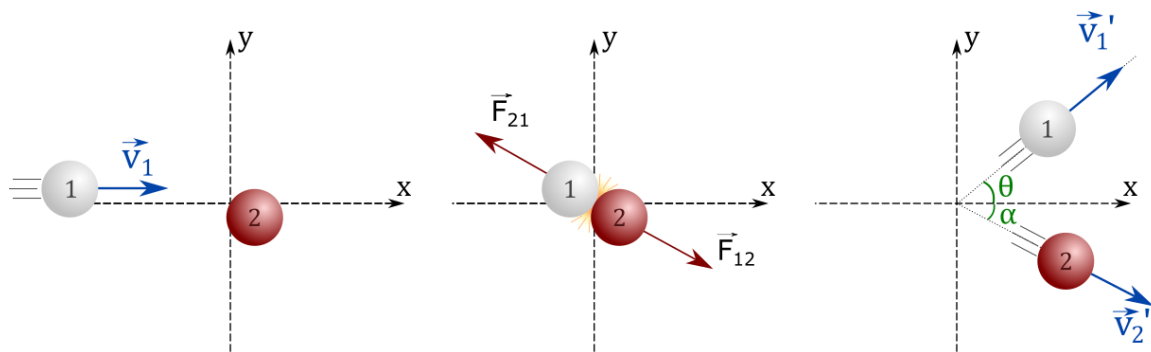
O que acabamos de entender é o que chamamos de **Princípio da Conservação do Momento Linear**, que diz que a quantidade total do momento de um sistema permanece a mesma se não houver influência de forças externas. No caso das bolas de bilhar, a única força atuante no sistema é a que surgiu durante a colisão das esferas e, sendo assim, o momento total se conservou.

Perceba que o caráter vetorial da Equação 3 mostra que o momento se conserva em todas as direções, não importa como for a colisão. Este princípio é tão relevante que mesmo

quando a massa inercial não está presente, como no caso das radiações, ele continua sendo válido.

Para finalizar este tema, observe a Figura 8.

Figura 8 - Colisão oblíqua.



Fonte: Próprio autor.

O efeito da colisão entre as duas bolas de bilhar, mesmo quando colidem oblíquamente, é bem intuitivo, não é mesmo? Mas veja a beleza da Física neste exemplo. A quantidade de movimento do sistema todo está inicialmente na esfera 1 que está em movimento no sentido positivo eixo x. Após a colisão, a esfera 1 começa a movimentar-se na diagonal, com uma componente no sentido positivo do eixo y e outra no sentido positivo do eixo x. Entretanto, como o sistema é isolado, não é possível que o mesmo possua uma quantidade de movimento total na direção y, uma vez que a quantidade de movimento inicial era apenas em x. O momento linear deve se conservar tanto em módulo quanto em direção e sentido. Conseqüentemente, o que ocorre com a esfera 2? Após a colisão ela também se movimentará na diagonal, porém, além de sua componente em x, também terá uma componente em y, mas no sentido negativo! Por quê? Justamente para que esta componente da esfera 2 anule a componente em y da esfera 1. Assim, a quantidade de movimento total continuará apenas na direção positiva do eixo x. Lembre-se deste exemplo, pois ele é particularmente importante no entendimento das pinças ópticas.

Nos próximos tópicos vamos ver o que ocorre quando um raio de luz incide sobre uma superfície, mas quero aproveitar a frase anterior para desde já deixar uma reflexão:

“Sabendo que a luz carrega momento e a vela solar é composta de espelhos, quais princípios físicos estão envolvidos em sua aceleração?”

A PROJEÇÃO DE VETORES

Grandezas vetoriais são aquelas que necessitam mais do que apenas um valor e uma unidade para serem definidas, precisam também de uma direção e um sentido. Massa, por exemplo, não é uma grandeza vetorial. Ela é uma medida da inércia e da quantidade de matéria de um corpo e não depende de qualquer informação direcional. Perceba que a frase “este saco de arroz tem 5 kg” é perfeitamente definida. Não há sentido em dizer “Este cachorro tem 2 kg de massa para a esquerda e 8 kg de massa para cima”.

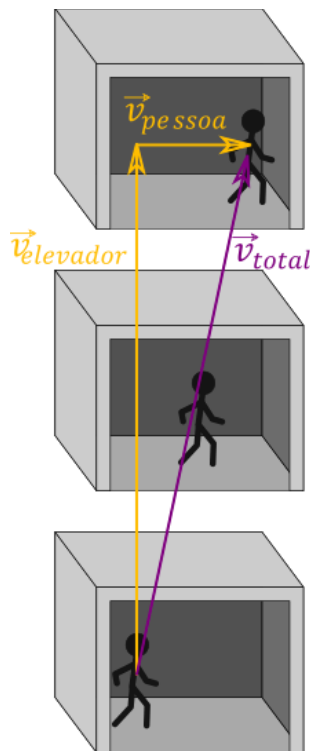
Força, como já demonstrado no tópico anterior, é uma grandeza vetorial, visto que sem definir sua direção, não há como compreender o evento. Por exemplo, imagine que uma pessoa olhe uma caixa no chão e fale: “Vou fazer força sobre esta caixa. ” Você consegue definir a ação que a pessoa irá tomar? Com certeza não. Ela pode empurrar, puxar, levantar ou até mesmo pressionar a caixa contra o chão. O efeito causado na caixa dependerá não somente da intensidade, mas da direção e sentido da aplicação dessa força. Neste mesmo raciocínio, podemos compreender o porquê de a quantidade de movimento ser uma grandeza vetorial, uma vez que ela depende da direção e sentido da velocidade do corpo.

Vetores são representações gráficas destas grandezas e possuem tamanho (intensidade), direção e sentido. Em várias situações em física precisamos da chamada **Análise Vetorial**, que consiste basicamente em analisar cada vetor em sua direção, para no final tirar alguma conclusão. Se você anda para a direita em um elevador em movimento de subida, por exemplo, qual foi efetivamente o seu deslocamento em relação à superfície da Terra? Observando a Figura 9 você percebe que terá uma velocidade vertical $\vec{v}_{elevador}$ e para cima, e uma velocidade horizontal \vec{v}_{pessoa} e para a direita. Uma forma simples de responder à pergunta é analisar cada movimento separadamente e, em seguida, uni-los utilizando geometria (Teorema de Pitágora neste caso).

Surge aqui uma pergunta: como analisar um problema cuja força ou velocidade não parecem ter “componentes”? No caso anterior, era óbvia a composição do movimento, pois uma velocidade era do elevador, outra da pessoa. Mas e se o movimento for um lançamento de um objeto qualquer, cuja velocidade é inicialmente oblíqua aos eixos vertical e horizontal e a trajetória é uma parábola? Neste caso, também iremos tratar como dois movimentos diferentes, mas como as velocidades horizontal e vertical nesse caso não são tão óbvias, utilizaremos a técnica da **Decomposição de Vetores**. Ela permite transformar o vetor velocidade, inicialmente

oblíquo, em duas componentes mais fáceis de trabalhar: uma velocidade vertical variável e uma velocidade horizontal constante.

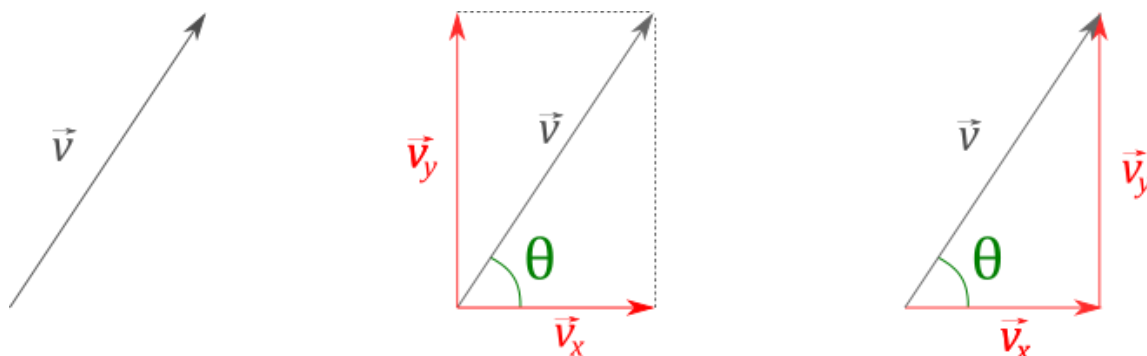
Figura 9 - Composição vetorial de movimentos em um elevador.



Fonte: Próprio autor.

Para decompor vetores, utilizamos simples trigonometria. O vetor \vec{v} da Figura 10, por exemplo, pode ser decomposto em duas componentes \vec{v}_x e \vec{v}_y utilizando as relações geométricas de seno e cosseno para um triângulo retângulo. Sendo assim, observa-se que $|\vec{v}_x| = |\vec{v}| \cos \theta$ e $|\vec{v}_y| = |\vec{v}| \sin \theta$ ⁷. Além disso, pode-se perceber também que $|\vec{v}|^2 = |\vec{v}_x|^2 + |\vec{v}_y|^2$.

Figura 10 - Vetor \vec{v} e suas componentes ortogonais



Fonte: Próprio autor.

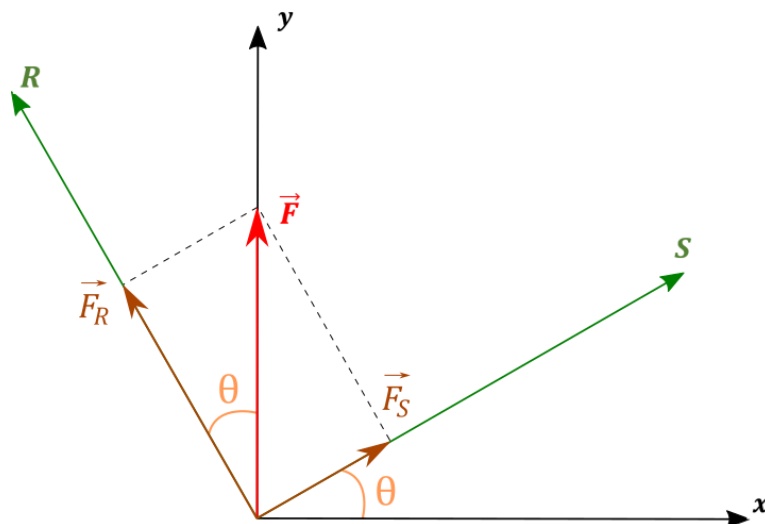
⁷ A simbologia de um vetor entre barras, como $|\vec{v}|$, significa “módulo do vetor”, ou seja, a intensidade ou valor da grandeza que aquele vetor representa, sem levar em consideração sua direção e sentido. Alternativamente, o módulo de um vetor pode ser representado simplesmente com a letra sem a seta. Neste caso, as equações se tornariam $v_x = v \cos \theta$ e $v_y = v \sin \theta$.

Vamos um pouco além. Existem situações em Física em que precisamos decompor um vetor em eixos auxiliares, mesmo que ele seja totalmente vertical ou horizontal. Exemplos como esse são vistos no Ensino Médio principalmente em casos de plano inclinado, onde o peso do objeto é vertical, mas como o movimento é diagonal precisamos muitas vezes decompor o vetor força-peso em duas direções perpendiculares, uma tangente e outra normal ao movimento. Você viu, um exemplo deste no teste da Aula 2. Vamos voltar a ele, mas generalizando a ideia para um ângulo θ qualquer, conforme Figura 11.

Como fazer para projetar o vetor \vec{F} nas direções das retas R e S ?

Fazendo as devidas relações geométricas, podemos perceber que o ângulo entre o eixo auxiliar R e o eixo y também é θ . As projeções de \vec{F} nos eixos auxiliares são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Componentes da força F na direção dos eixos auxiliares R e S .



Fonte: Próprio autor.

Assim, verificamos que $|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cdot \cos \theta$ e $|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \cdot \sin \theta$.

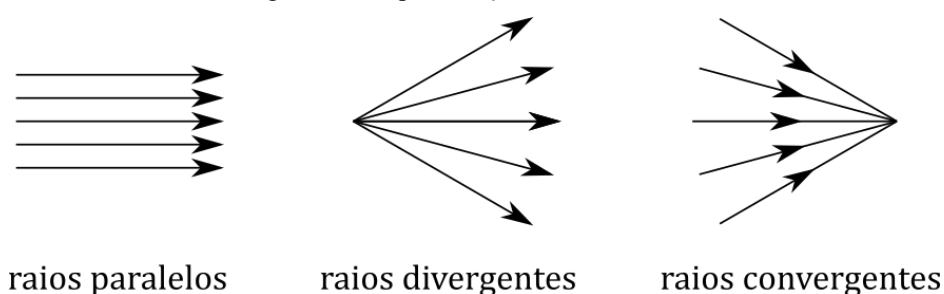
A LUZ E SEUS FENÔMENOS

Antes de tudo, vamos estabelecer alguns limites. Embora a teoria moderna da luz destaque que ela possui caráter ondulatório e corpuscular dependendo de como a observamos, iremos trabalhar aqui com o chamado limite da Óptica Geométrica. Neste limite, os efeitos mais comuns do caráter ondulatório da luz como interferência e difração serão desprezados, visto que as dimensões dos obstáculos, objetos e anteparos são muito maiores do que os

comprimentos de onda das radiações que estudaremos. A visualização destes efeitos, nestes casos, é prejudicada.

Assim, tenha em mente que a luz é realmente uma onda eletromagnética e, como tal, possui frequência e comprimento de onda, transporta energia e possui velocidade constante para um meio homogêneo. Mesmo assim, consideraremos que ela é composta de vários “raios de luz” (Figura 12) que possuem uma propagação retilínea e podem sofrer desvios ao incidir em superfícies. Com isto dito, é hora de entender alguns **fenômenos ópticos**.

Figura 12 - Representação dos raios de luz.



Fonte: Próprio autor.

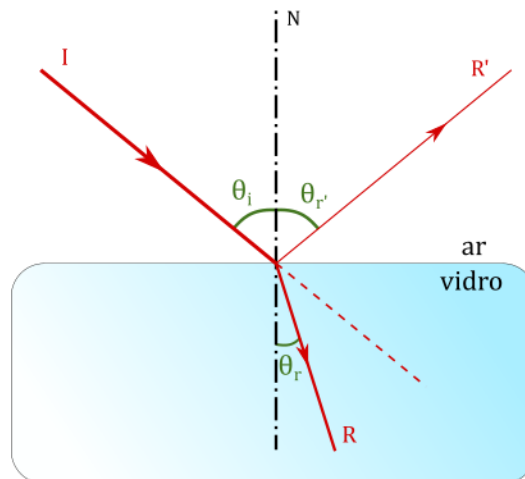
Quando a luz incide em uma superfície, três fenômenos podem ocorrer: **reflexão, refração e absorção**.

A absorção ocorre quando o raio incide em uma superfície, mas não a atravessa e tampouco volta para o meio de origem. Imagino que você saiba qual o resultado deste fenômeno. É o que acontece quando expomos nossa pele à luz solar: a superfície que absorve a radiação eleva sua temperatura e a sensação é a de que o “Sol está nos queimando”. Em geral, objetos com cores mais escuras tendem a ter uma maior absorção da radiação incidente em relação a objetos transparentes ou de cores mais claras.

Para explicar a reflexão e a refração, utilizarei um único exemplo: um raio de luz incidindo na superfície que separa o ar atmosférico de um bloco de vidro, também chamada de interface ar-vidro, com um ângulo de incidência θ_i . Se quiser, pode imaginar um raio de luz atravessando o vidro de uma janela. Se observarmos a Figura 13, perceberemos que parte do raio de luz que incide na interface (raio I) origina um raio **refletido** R’ que volta ao ar e um raio **refratado** R transmitido para o vidro.

A trajetória do raio R’ está de acordo com o que chamamos de Lei da Reflexão: o ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de reflexão, isto é, $\theta_i = \theta_r$. Além disso, o raio refletido deve estar contido no mesmo plano do raio incidente e da reta normal à superfície. Veja que a forma que raio refletido se comporta é simétrica e intuitiva, diferente do raio refratado, que neste caso sofre um desvio em sua trajetória.

Figura 13 - Raio de luz incidindo obliquamente na interface ar-vidro.



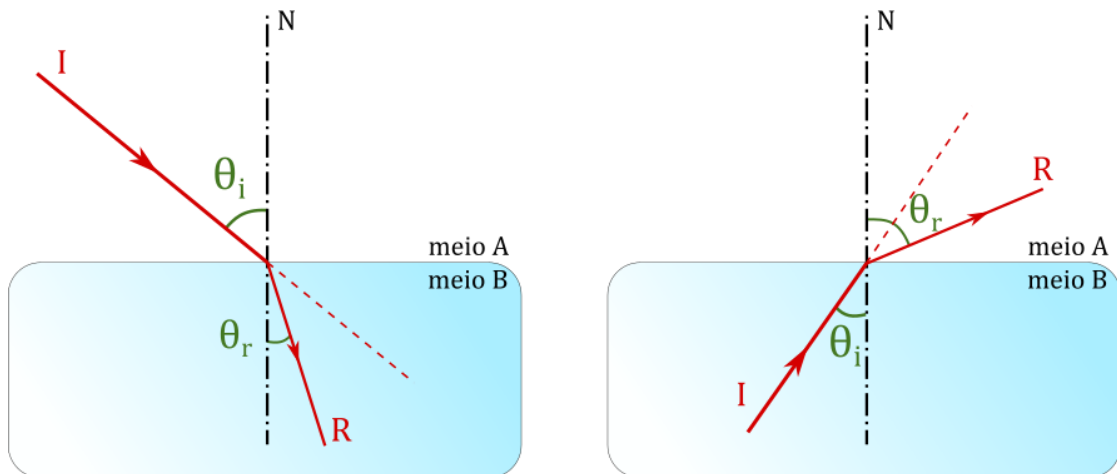
Fonte: Próprio autor.

O que ocorre na refração é que quando o raio passa para outro meio com diferentes características, sua velocidade de propagação é alterada e, dependendo do caso, sua direção de propagação também. A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz neste outro meio (v) é chamada de **índice de refração absoluto do meio**, simbolizado pela letra n como mostra a Equação 4:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

O índice de refração pode ser entendido como a dificuldade que o meio oferece à propagação de determinada radiação. Assim, quanto maior o índice de refração, menor a velocidade de propagação. Diz-se, quando um meio B possui índice de refração maior que um meio A, ou seja, $n_B > n_A$, que o meio B é **mais refringente** do que o meio A. Assim, para refrações com incidências oblíquas, temos a seguinte regra: quando um raio passa de um meio **menos** refringente para um meio **mais** refringente, sua direção é alterada de modo a se aproximar da reta normal à superfície de separação. O contrário é verdadeiro, isto é, quando um raio passa de um meio **mais** refringente para um meio **menos** refringente, sua direção é alterada de modo a se afastar da reta normal à superfície de separação. Esta regra pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Refração para $n_B > n_A$



Fonte: Próprio autor.

Não vá achando que este desvio é arbitrário. O comportamento de um raio refratado é dado por uma relação matemática conhecida como Lei de Snell-Descartes.

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (5)$$

Note que na Equação 5 os índices de refração não estão relacionados diretamente aos meios A e B, mas levam os números 1 e 2 que significam o meio de onde o raio vem e o meio para onde o raio vai, respectivamente.

Agora que você já entendeu o comportamento da luz ao incidir em uma superfície, o assunto começa a ficar mais interessante. Por quê? Vamos conectar o que acabamos de ver com o exemplo das bolas de bilhar, que vimos no tópico anterior, representado na Figura 8.

Quando a esfera 1 colide com a esfera 2, há transferência de momento linear causada pelas forças do choque. Ao mesmo tempo que a força \vec{F}_{21} reduz a quantidade de movimento da esfera 1, a força \vec{F}_{12} aumenta o momento linear da esfera 2, de acordo com a 2ª Lei de Newton. Agora pense, quando a luz incide em um espelho e é refletida em outra direção, o seu momento linear foi alterado e, como em uma colisão, a luz exerceu força no espelho!

Talvez agora você comece a compreender melhor como funciona uma vela solar: utilizando espelhos, muda-se a direção de propagação da radiação por meio da reflexão; como a radiação carrega momento, a variação deste só pode ocorrer se houver a aplicação de uma força; como reação, a radiação exerce força sobre a vela, acelerando-a.

Será que é possível aplicar esta mesma ideia para o fenômeno da refração? Sim! Enquanto a luz causa uma força de “empurrar” no corpo que a reflete, ela causará uma força de “desvio” no corpo que a refrata. Para tentar entender melhor, lembre-se do exemplo da colisão oblíqua, representada na Figura 8. Se, por exemplo, a luz é desviada para a direita, para a

conservação do momento linear, o corpo, por reação, será empurrado para a esquerda! Mas lembre-se, a intensidade da força da luz, denominada pressão de radiação, é da ordem de piconewtons. Assim, embora tenhamos chegado em conclusões incríveis quanto à relação entre os fenômenos ópticos e as leis da mecânica, não é como se os seus óculos fossem saltar do seu rosto ao refratar a luz do Sol.

Para encerrar este tópico, tentarei elucidar uma última pergunta que talvez esteja latente em sua mente: “A luz é uma onda eletromagnética; ondas não carregam matéria, apenas energia; como é possível que ela possua momento?” Bom, a resposta exata para isso é um tanto quanto complexa demais para ser explicada aqui, mas posso lhe oferecer uma maneira mais fácil de pensar. De acordo com a teoria quântica de Max Planck, a radiação não carrega energia de forma contínua, mas sim discreta. Isso significa que a energia de uma radiação se apresenta em forma de pequenos pacotes, denominados *quanta* (ou *quantum*, no singular). Anos mais tarde, Einstein propôs que esses pacotes de energia estavam associados ao comportamento corpuscular da luz, ao explicar um efeito que a teoria clássica da ondulatória não era capaz, o chamado **Efeito Fotoelétrico**. Esses pacotes de luz foram então denominados **fótons**, as “partículas de luz”. Eles não possuem massa inercial, mas possuem momento e energia, baseados em sua frequência. Assim, se você preferir, pode imaginar os raios de luz como um conjunto de muitas partículas de energia sem massa que viajam todas no mesmo sentido e, quando atingem os objetos, transferem momento.

Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas

Agora que os conceitos necessários de mecânica e óptica já foram apresentados, chegou a grande hora: vamos entender como funcionam as pinças ópticas! É importante que você tenha em mente os fótons e os efeitos causados por eles quando incidem em uma superfície. Por falar nisso, começaremos exatamente neste assunto. Vamos aprofundar um pouco sobre o que comentamos na aula 1, o fato de a radiação conseguir exercer pressão.

A PRESSÃO DE RADIAÇÃO

Vamos fazer uma estimativa da ordem de grandeza da força que a radiação pode exercer em uma superfície. Cada fóton que compõe uma onda eletromagnética possui uma energia E dada por:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

Em que h é a constante de Planck⁸, f é a frequência da onda, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda associado à radiação. Note que quanto maior a frequência da radiação, maior é a energia transferida por ela. Assim, um fóton com frequência na região do infravermelho, por exemplo, possui menor energia do que na faixa da luz visível ou na faixa do ultravioleta. Esta informação será importante para compreendermos alguns efeitos que serão mencionados no decorrer da explicação, guarde-a!

É conveniente também mencionar que o momento p associado a um fóton é dado por:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (7)$$

Imaginemos uma situação em que apontamos um laser para um espelho de forma que a luz incida perpendicularmente ao plano do espelho. Podemos idealizar, para este caso, que a reflexão será total e a força exercida pela luz será a maior possível.

⁸ A constante de Planck, que possui valor $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s, é uma das constantes fundamentais da Física. Envolve o caráter corpuscular e ondulatório da radiação e de objetos cujas dimensões são de ordem atômica, sendo assim de importância absoluta para o desenvolvimento e estudo da Mecânica Quântica. Foi introduzida por Max Planck, um dos fundadores da teoria quântica. Em 2019, foi escolhida para ser a base na definição do quilograma (kg) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).

Pense agora na colisão dos fótons com o espelho e associe-a à 2ª Lei de Newton. Se os fótons mantiverem sua direção, mas trocarem o sentido de propagação, a única diferença entre o momento linear antes da colisão e o momento linear depois da colisão é o sinal, de modo que o módulo da força exercido sobre o espelho é descrito como:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{fóton} - (-p_{fóton})}{\Delta t} = \frac{2p_{fóton}}{\Delta t} \quad (8)$$

Realizando a devida substituição da Equação 7 na Equação 8, teremos:

$$F = \frac{2E}{c \Delta t} = \frac{2P}{c} \quad (9)$$

em que P é a potência do laser. Podemos agora, estimar a ordem de grandeza da máxima força exercida pela luz quando refletida completamente de forma ortogonal em um anteparo. Por exemplo, aquele apontador laser que o seu professor usa para destacar itens em slides durante a aula tem cerca de 3 mW de potência. A força máxima exercida por ele na superfície é de cerca de 20 piconewtons. Para que se notasse algum efeito, o objeto atingido por esta luz teria que ter uma massa muito pequena. Todavia, pode ser que você não tenha se convencido com este exemplo, já que a fonte da luz é tão “fraca”. Vou lhe dar outro exemplo.

Um estudo mostrou que a irradiação solar na cidade de São Paulo, no mês de Junho, pode chegar a 600 W/m² ao meio dia⁹. Qual a máxima força que esta radiação pode exercer ao incidir perpendicularmente em um espelho de 1 m²? Mesmo para este valor aparentemente alto, a intensidade da força é da ordem de 4 micronewtons, que é aproximadamente o peso de um pequeno grão de areia (aproximadamente 400 ng).

Veja que a dedução matemática para a estimativa da força exercida pela radiação é relativamente simples. Entretanto, embora prevista teoricamente, a comprovação experimental da pressão de radiação é um tanto complexa, pois isolar essa variável de forma que fatores externos não influenciem na medição não é um tarefa fácil. O controle deste tipo de experimento exige precisão e controles sofisticados. A seguir lhe explicarei o porquê.

⁹ GONZALES, R. M. P, 1998. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas** (1998).

A DESCOBERTA DAS FORÇAS ÓPTICAS

Como comentado, uma superfície pode absorver parte da radiação incidente, aumentando a sua temperatura. Por este motivo, sempre houve grande dificuldade em realizar experimentos que conseguissem medir a pressão de radiação, pois as chamadas **forças radiométricas** se faziam presentes, prejudcando os resultados. Estas forças são decorrentes, por exemplo, do movimento das massas gasosas devido à diferença de temperatura. O gás quente tende a subir por ser menos denso e o gás frio tende a descer por ser mais denso. Este tipo de movimento prejudicava qualquer medida de deslocamento causada pela incidência da radiação: “Este corpo moveu-se por ação da pressão de radiação, ou pelo movimentos das massas gasosas?”

Um exemplo de experimento que ilustra o que foi comentado é o do Radiômetro de Crookes, inventado pelo químico Sir William Crookes em 1873, e é apresentado na Figura 15. Trata-se de um bulbo de vidro preenchido com gás a baixa pressão (vácuo parcial) e hélices montadas em um eixo. Como se pode perceber, cada uma dessas hélices é pintada de cor preta de um lado e polida do outro. Ao incidir radiação sobre o radiômetro, observa-se que as hélices começam a se mover. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a velocidade das hélices.

Figura 15 - Radiômetro de Crookes.



Fonte: Sala de Física.¹⁰

Segundo Crookes, o movimento das hélices se dava pelo choque dos fótons ao incidirem sobre elas. Uma explicação sedutora, porém equivocada. Pense bem, como superfícies polidas

¹⁰ <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/radiometro.html>

refletem mais radiação do que superfícies escuras, o momento linear que os fótons transferem ao lado polido da hélice certamente é maior do que do lado preto. Assim sendo, os fótons deveriam empurrar o lado polido para trás. Entretanto, o sentido do movimento de rotação é, na prática, o oposto do esperado! O que ocorre na realidade é que o lado de cor escura absorve maior radiação, elevando sua própria temperatura e do gás em contato com ela. Assim, o gradiente de temperatura gera correntes de convecção que promovem um movimento que empurra a parte escura da hélice para trás.

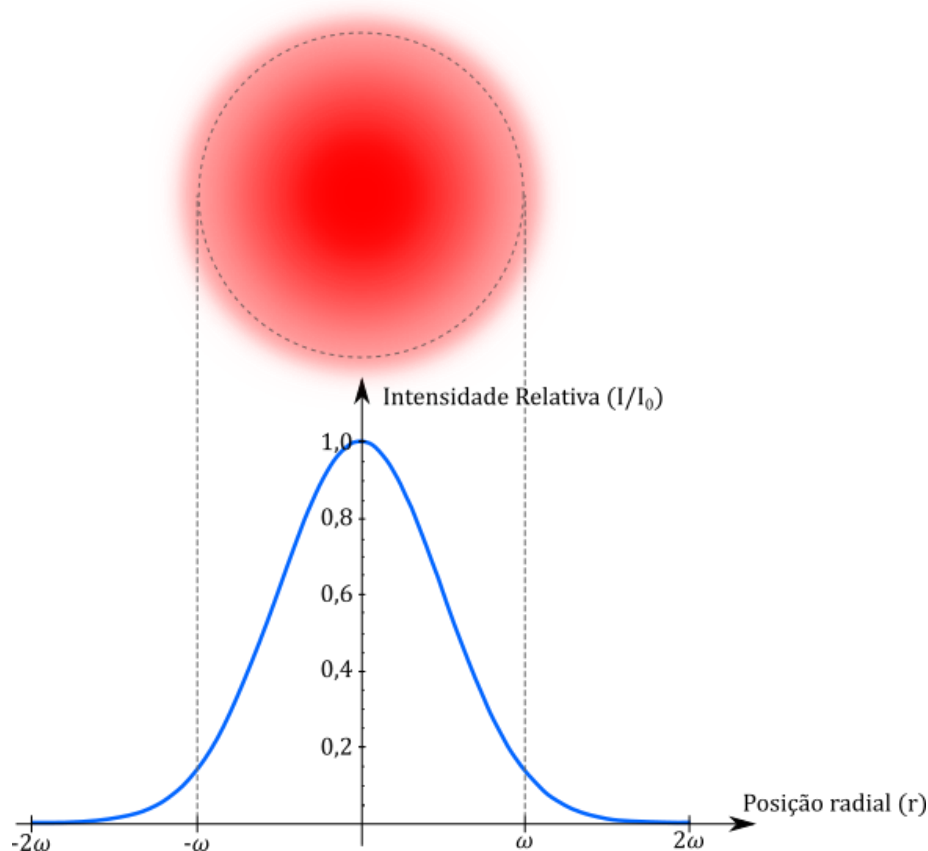
Caso você esteja intrigado, pensando que a intensidade dessas forças radiométricas é muito pequena, lembre-se que a intensidade da pressão de radiação também é! Estamos falando de intensidade de forças na ordem de nanonewtons ou piconewtons. Uma partícula que possui massa suficientemente pequena para sofrer ação de uma pressão de radiação, certamente sofre influência do movimento do fluido que compõe o meio em que a partícula se encontra. Além disso, dependendo do material que compõe a partícula, este poderia deformar-se devido à ação térmica da absorção da radiação.

Em 1969, um físico americano chamado Arthur Ashkin conseguiu driblar este problema utilizando “microesferas feitas de material relativamente transparente suspensas em um meio relativamente transparente”, segundo as palavras do próprio cientista¹¹. Com isso, conseguiu operar livre de efeitos térmicos utilizando um laser com uma potência cerca de mil vezes maior do que os experimentos realizados na época. Mas antes de explicar exatamente o que ocorreu com o experimento de Ashkin, se faz necessário comentar algumas propriedades do laser.

Provavelmente você já viu um feixe laser e notou algumas características interessantes: potência luminosa altamente focalizada, com uma única cor e com uma direção retilínea bem definida. Uma propriedade interessante e que talvez você não saiba é que a intensidade luminosa de um feixe laser não é uniforme, isto é, os raios de luz próximos ao eixo de propagação do laser tendem a ser mais intensos. Essa variação de luminosidade pode se apresentar de maneiras diferentes, mas o laser que Ashkin usou possuía o que chamamos de **perfil gaussiano**. Na Figura 16 é apresentada a variação da intensidade luminosa de acordo com a posição radial. Note que ela é grande no centro do feixe, e diminui ao se aproximar das bordas.

¹¹ ASHKIN, A. *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* (1970).

Figura 16 - Intensidade relativa I/I_0 de um feixe laser com perfil gaussiano em função da posição radial r .

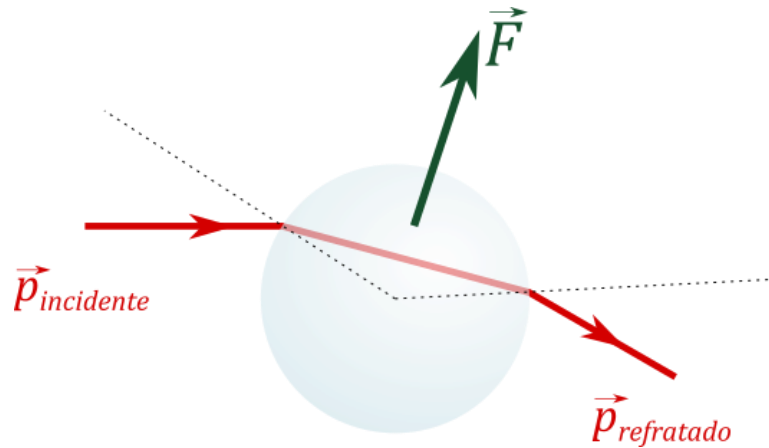


Fonte: Próprio autor.

Em seu experimento, Ashkin utilizou esferas de látex transparente suspensas livremente em água. Com apenas alguns miliwatts de potência, atingiu as partículas com um laser e observou que elas foram empurradas na direção de propagação da luz. Verificou que a velocidade que elas adquiriram estava aproximadamente de acordo com a estimativa da teoria, sugerindo que o efeito fosse realmente devido à pressão de radiação. Mas algo incrível aconteceu: uma força não prevista surgiu, puxando as partículas que estavam na borda do feixe para a região de maior intensidade. Isso significa que as partículas não só estavam sendo empurradas na direção do feixe laser, como sendo atraídas para o centro deste. Mesmo movimentando o laser de um lado para outro, as partículas continuavam sendo atraídas para seu centro. As partículas estavam sendo guiadas pela luz!

Neste momento, surge uma pergunta: esta força transversal seria também resultado da pressão de radiação? Para respondê-la, vamos utilizar todos os conceitos aprendidos na aula 3. Observe a Figura 17, que mostra o que ocorre quando um raio de luz atinge uma esfera transparente com índice de refração superior ao meio onde está imersa.

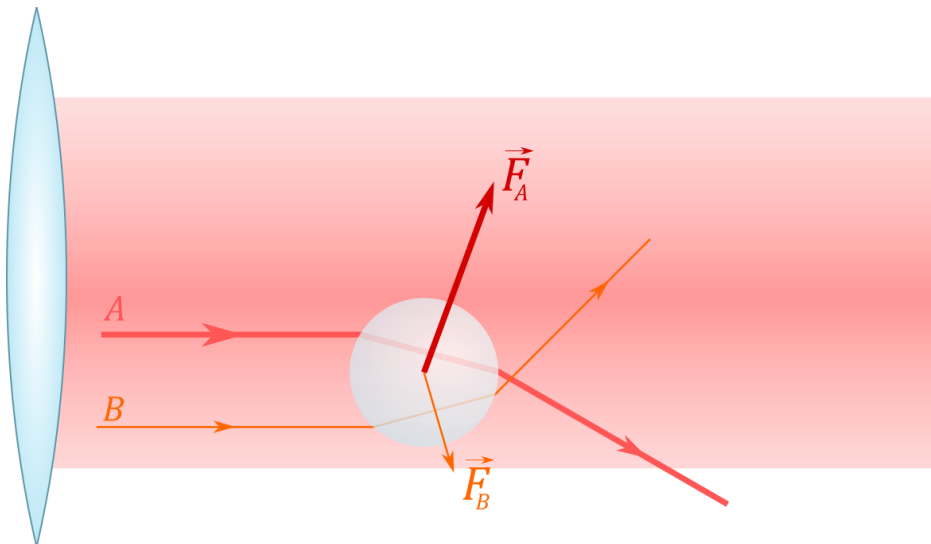
Figura 17 - Refração de um raio de luz em uma esfera de material transparente.



Fonte: Próprio autor.

Note que quando o raio de luz desvia, podemos interpretar que os fótons que o compõe tiveram a direção do seu momento linear alterado e, assim como no exemplo da colisão oblíqua das bolas de bilhar, a conservação do momento exige o surgimento de uma força na esfera para compensar esse desvio. Todavia, considerando que o laser é composto de vários raios de luz que incidem sobre a esfera, como isso explica o movimento verificado no experimento de Ashkin? Para entendê-lo, observe agora a Figura 18, que ilustra uma esfera sendo atingida por dois raios A e B arbitrários, paralelos entre si, representando a interação entre a luz do laser e a partícula. Note que a esfera encontra-se em uma região de influência do laser, mas fora do centro deste.

Figura 18 - Esquema de forças na esfera em razão dos raios refratados.



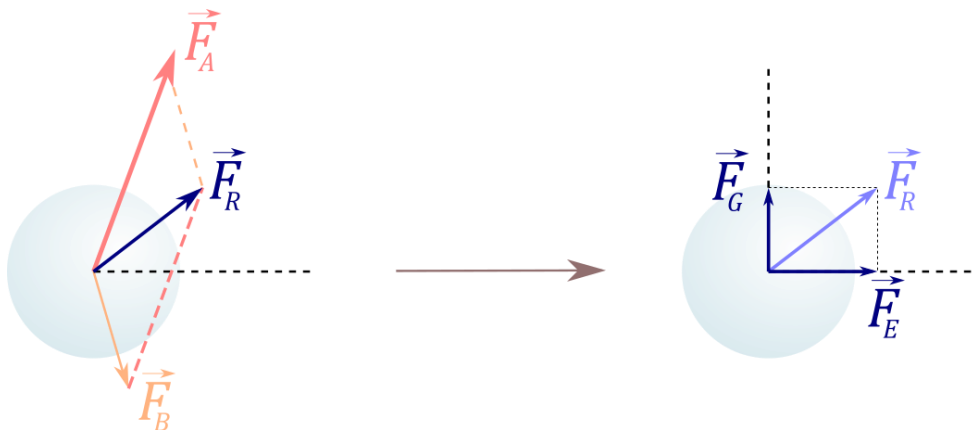
Fonte: Próprio autor.

A refração dos raios na esfera faz com que duas forças \vec{F}_A e \vec{F}_B apareçam como explicado anteriormente. Talvez você esteja se perguntando: “Mas por que a força que puxa a partícula

para o centro do feixe laser é maior do que a força que empurra ela para fora?” Em outras palavras, por que $|\vec{F}_A| > |\vec{F}_B|$?

Lembre-se do perfil gaussiano do feixe laser! Quanto maior a intensidade luminosa, maior a quantidade de fótons que compõe os raios de luz daquela região. Assim, como o raio A está em uma região de maior intensidade luminosa, a força produzida por seu desvio é, por consequência, maior. Note também que a resultante destas duas forças, que podemos chamar de **força óptica resultante** \vec{F}_R , pode ser projetada em eixos ortogonais entre si, facilitando assim nosso discernimento com relação aos efeitos. A Figura 19 mostra a força óptica resultante com uma componente na direção de propagação do feixe e outra na direção radial do feixe. A primeira recebe o nome de **força de espalhamento** \vec{F}_E (traduzida do inglês, *scattering force*) e a segunda é denominada **força de gradiente** \vec{F}_G , justamente porque surge devido ao gradiente de intensidades do feixe laser.

Figura 19 - Componentes da força óptica.



Fonte: Próprio autor.

Há algo interessante a ser mencionado: as esferas utilizadas por Ashkin possuíam índice de refração superior ao meio em que estavam imersas. O látex possui índice de refração absoluto $n_{\text{látex}} \approx 1,58$ para a radiação utilizada, e a água, $n_{\text{água}} \approx 1,33$. Assim, você pode verificar que os desvios observados estavam de acordo com o que vimos na aula sobre refração da luz. Tome nota: a reta normal a uma superfície esférica é sempre coincidente com o centro da esfera. Talvez agora fique mais fácil verificar a Lei de Snell.

Antes de prosseguir, pense um pouco sobre a seguinte pergunta:

“O que ocorreria se realizássemos a mesma experiência, mas com esferas cujo índice de refração fosse menor do que o meio onde estariam suspensas?”

Pode ser que a sua resposta intuitiva tenha sido a mesma de Ashkin. Ele realizou um experimento para comprová-la. Disparou um feixe laser contra bolhas de ar produzidas pela agitação de uma mistura de glicerol e água. Como você provavelmente deve ter pensado, o efeito foi justamente o oposto do experimento anterior: as bolhas atingidas pelo laser foram expulsas da região de maior intensidade, como se estivessem sendo repelidas.

A seguir, comentarei um pouco sobre o desenvolvimento das pinças ópticas ao longo do tempo e quais os desafios enfrentados em suas aplicações contemporâneas. Para finalizar este tópico, deixo duas questões para que possa refletir e avaliar os conhecimentos obtidos:

1) Por que as partículas usadas nos experimentos precisam ser transparentes?

A resposta inicial é simples e objetiva: sem refração não há força de gradiente. Entretanto, é possível estender a resposta a algumas possibilidades. Sendo opaca e colorida a esfera absorveria parte da radiação e acentuaria os efeitos radiométricos comentados no texto, dificultando a medida da pressão de radiação. Sendo opaca e polida, como uma esfera metálica, a esfera refletiria os raios de luz e o momento linear desviado apareceria no sentido de expulsar a esfera do centro do feixe laser. É claro, se esta esfera estiver localizada exatamente no centro do feixe, a contribuição das forças transversais se anularia e a partícula seria empurrada na direção do feixe laser.

2) O que ocorreria se as partículas estivessem no vácuo?

Professor, é interessante lembrar os alunos sobre o efeito observado no simulador utilizado na aula 1. A viscosidade do meio material funciona como um amortecedor para o movimento da partícula no interior do feixe laser. As forças ópticas tendem a acelerar a partícula e, sem a ação da força de resistência do fluido, as partículas tenderiam a executar um movimento oscilatório praticamente infinito em torno do centro do feixe sem perda de energia cinética, como em um sistema massa-mola.

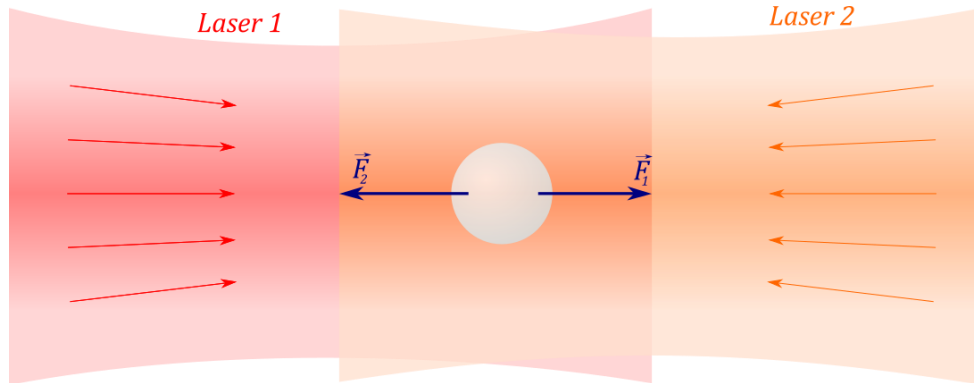
AS PINÇAS ÓPTICAS

Variados estudos e experimentos foram realizados e muitos trabalhos foram publicados a partir do que foi descoberto por Ashkin, mas vamos nos ater aos que levaram ao desenvolvimento da tecnologia das pinças ópticas.

Inicialmente, lembre que as partículas são atraídas para o centro do feixe laser pela força de gradiente, mas este não é o único efeito. A força de espalhamento empurra as partículas até que elas colidam com o anteparo da câmara onde estão confinadas. O que poderia ser feito para que as partículas pudessem se manter “aprisionadas” pelo feixe laser, sem qualquer tipo de deslocamento? De uma forma de bem simples, você pode pensar que para anular uma força que aponta para a esquerda, precisamos de uma força que seja de igual intensidade mas que aponte para a direita. Nesse sentido, acabamos de desvender como Ashkin criou o primeiro modelo de uma armadilha óptica tridimensional. Este modelo recebeu o nome de *2-BEAM TRAP* e consiste basicamente em atingir a partícula suspensa com dois feixes laser levemente

focalizados, com mesma potência, mesmas dimensões e com sentidos opostos, com o objetivo de anular a força de espalhamento (Figura 20).

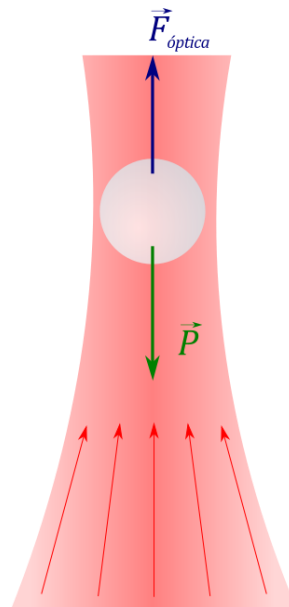
Figura 20 - Armadilha óptica constituída por dois feixes laser.



Fonte: Próprio autor.

Outro experimento muito interessante foi a levitação de pequenas partículas utilizando a força da pressão de radiação e a estabilidade oferecida pela força de gradiente. Contrapondo o peso da partícula com a força de espalhamento, as partículas podiam ser manipuladas livremente simplesmente movendo o feixe laser (Figura 21).

Figura 21 - Partícula levitando sob ação exclusiva da pressão de radiação.

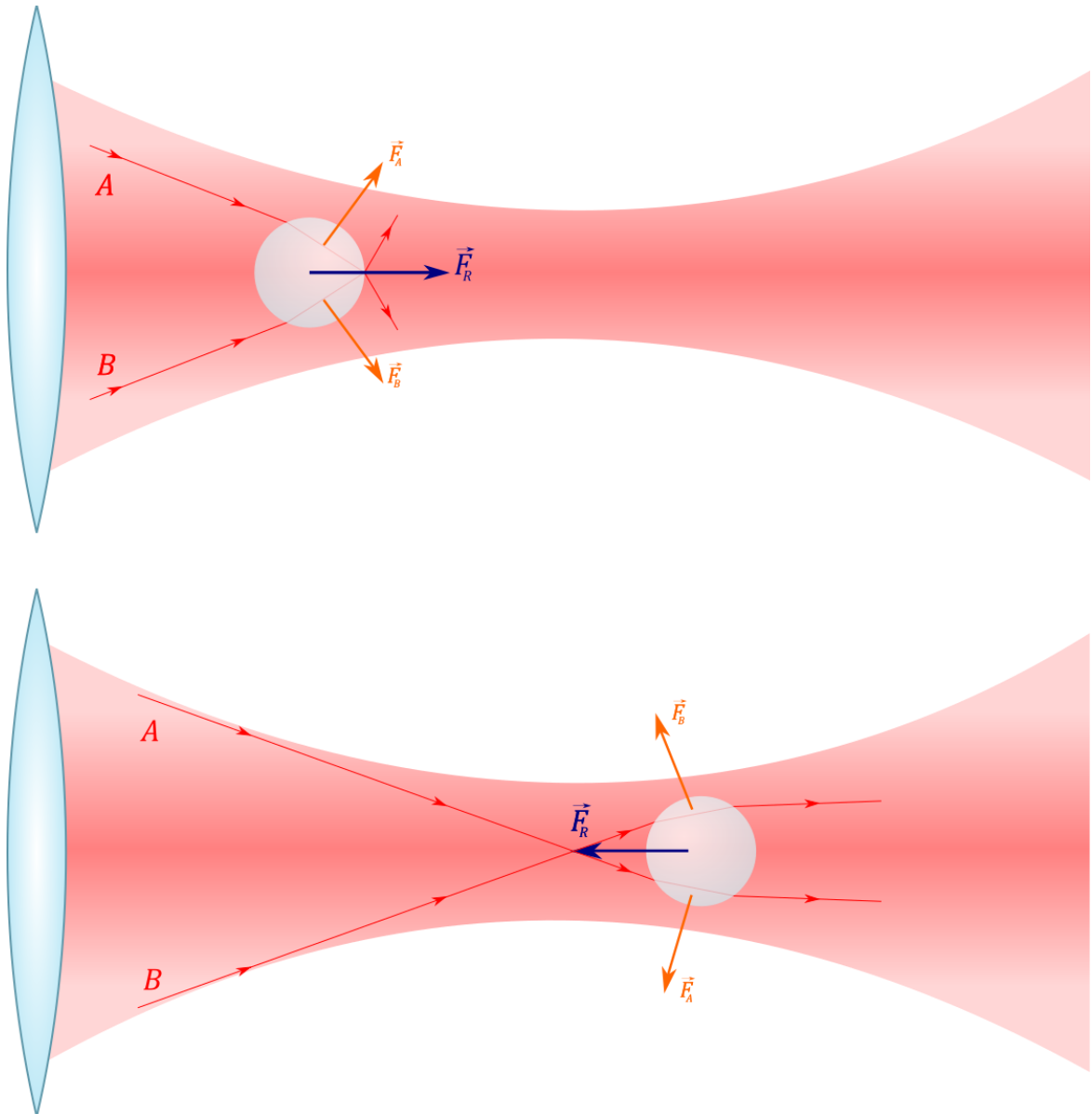


Fonte: Próprio autor.

Finalmente, em 1986, Ashkin publica um artigo revelando a observação da armadilha óptica tridimensional a partir de um único feixe laser! Como seria possível? Utilizando um laser altamente focalizado, as forças ópticas que atuam na partícula tendem a levá-la sempre à região de maior intensidade luminosa que, neste caso, é exatamente no ponto focal do laser.

A Figura 22 mostra como a partícula é sempre direcionada para o mesmo ponto, independentemente de estar à frente ou atrás do foco do laser. Observe bem os desvios causados nos raios devido à refração e o surgimento das forças ópticas. Perceba que estão todos de acordo com as explicações dadas anteriormente. Este é o modelo do que chamamos hoje de **pinças ópticas**, uma ferramenta de luz que, com um único feixe laser, pode manipular partículas.

Figura 22 - Modelo de pinças ópticas utilizando um único feixe focalizado.



Fonte: Próprio autor.

Veja que, alterando o foco da lente, podemos mover a partícula para frente ou para trás. Alterando a potência do laser, podemos exercer maior ou menor força nas partículas. Este último efeito você deve ter notado ao utilizar o simulador na aula 1.

Em 2018, Ashkin recebeu o prêmio Nobel de Física pela invenção das pinças ópticas e por suas aplicações nas ciências biológicas.

PINÇAMENTO ÓPTICO EM SISTEMAS BIOLÓGICOS

Como comentamos na aula 1, a pinça óptica tem sido muito utilizada em ambientes microscópicos para estudar sistemas biológicos. Com ela é possível medir propriedades mecânicas de microorganismos e células, além de outros sistemas. Já imaginou poder desenrolar uma molécula de DNA e testá-la para verificar qual sua resistência mecânica? A pinça óptica permitiu este estudo, além de outros como manipulação de bactérias e vírus!

No entanto, é importante que entenda que nem tudo é tão simples e alguns cuidados precisam ser tomados. Lembre-se dos fenômenos ópticos: o que ocorre quando a radiação atinge uma superfície? Reflexão, refração e/ou absorção. Este último merece uma atenção especial quando falamos de sistemas biológicos, pois estamos tratando de radiação altamente focalizada atingindo objetos que não são totalmente transparentes. Assim, os efeitos térmicos produzidos pela absorção não podem ser desprezados.

Aprendemos em nossa jornada no Ensino Médio que cada material possui uma “preferência de absorção” para cada tipo de radiação. As folhas das plantas, por exemplo, possuem grande absorção das frequências na faixa da luz visível, exceto na cor verde que é em grande parte refletida. Assim, como sistemas biológicos são compostos de uma variedade de materiais, a escolha do laser correto é um grande desafio, pois a absorção da maioria das substâncias presentes deve ser mínima para que a temperatura do sistema não se eleve de forma considerável, aumentando assim o risco de destruir a amostra.

As radiações com comprimentos de onda entre 800 a 1300 nm estão na faixa do infravermelho e possuem baixa absorção para a maioria dos materiais biológicos. Nesse sentido, um dos tipos de laser preferidos para estes tipos de aplicações é o Nd:YAG emitindo em 1064 nm.

Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos

Este material tem como objetivo principal lhe mostrar como é possível, dentro de certos limites teóricos, entender o funcionamento das pinças ópticas com os conceitos de física básica aprendidos ao longo de sua jornada no Ensino Médio. Mas não há como saber se este objetivo foi alcançado ao longo das aulas sem realizar algum tipo de avaliação. O que vou lhe propor baseia-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e finalizará com chave de ouro a nossa sequência de aulas.

Ausubel foi um grande psicólogo da educação e teórico da área de aprendizagem que, como dito, criou um conceito conhecido como Aprendizagem Significativa. Consiste, de forma prática, em um aprendizado que não será esquecido em pouco tempo. Isso porque o principal objetivo deste aprendizado é fazer com que os novos conhecimentos não entrem de forma aleatória na cabeça do aprendiz, mas sejam agregados à sua estrutura cognitiva pré-existente. Se ficou muito confuso, pense no seguinte: seria possível aprender Conservação do Momento Linear sem ao menos saber o que são vetores? Ou ainda, aprender como funcionam os motores térmicos sem conhecer o comportamento dos gases? Talvez de forma mecânica sim, mas é um conhecimento que, após poucos dias, seria completamente esquecido.

Neste sentido, a sequência de aulas foi montada para que antes de entender as pinças ópticas, você obtivesse todo o fundamento teórico para ser capaz de compreender os fenômenos envolvidos! Mesmo assim, não é como magia, determinados conceitos precisam de um pouco mais de esforço e repetição pra que possamos compreendê-los. É assim, por exemplo, com a dualidade onda-partícula da luz que gera tantas interrogações na cabeça dos alunos.

A avaliação será composta por duas atividades:

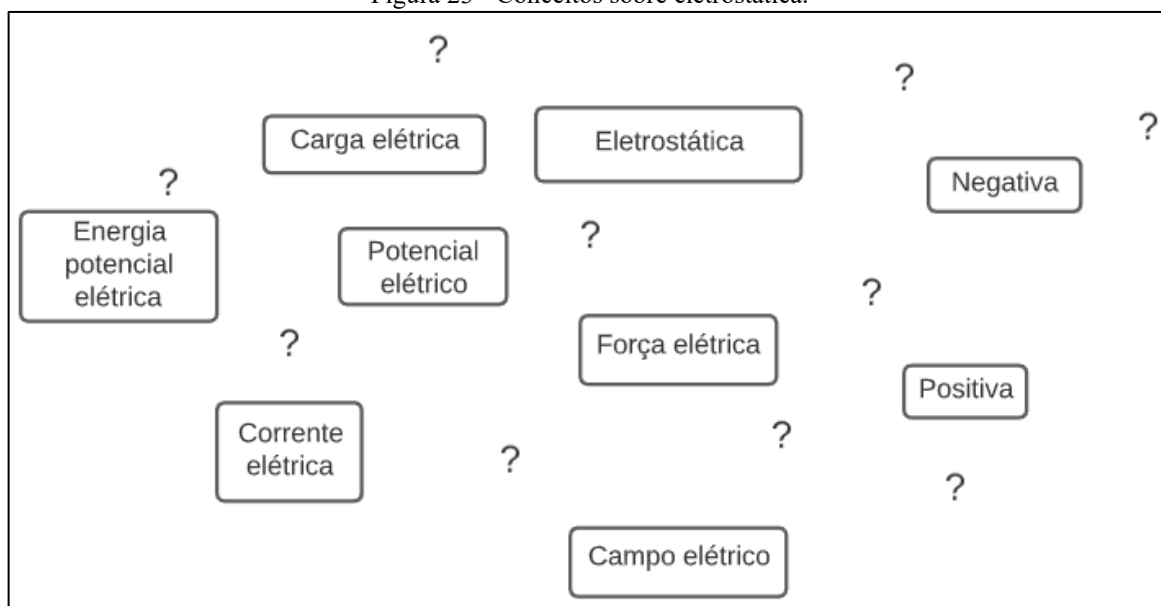
- 1) Descreva, com suas palavras, como ocorre o fenômeno do pinçamento óptico descoberto por Arthur Ashkin. O seu texto deve, preferencialmente, possuir figuras que auxiliem a sua explicação. Não há necessidade de explicar cada um dos modelos de pinça óptica. Escolha uma das configurações ilustradas na Aula 4 e comente sobre o motivo do surgimento das forças.
- 2) Construa um mapa conceitual com os temas Mecânica e Óptica no topo da hierarquia. Escolhendo alguns conceitos-chave, desenvolva o mapa até uni-los ao final em uma caixa com o escrito “Pinças Ópticas”.

Caso você não saiba o que é um mapa conceitual, não se preocupe, pois a seguir lhe explicarei e mostrarei como esta ferramenta se mostra efetiva como forma de avaliação e técnica de estudo.

Mapas conceituais são diagramas organizados de forma hierárquica e que busca mostrar conexões entre conceitos e ideias. Não deve, porém, ser confundido com diagramas de fluxo ou organogramas, pois devem ser desprovidos de temporalidade e sequencialidade. Neste sentido, o caráter hierárquico de um mapa conceitual refere-se à abrangência dos conceitos, sendo que os conceitos mais gerais se localizam na parte superior os conceitos mais específicos na parte inferior.

O que acontece geralmente quando pensamos em um assunto, vários conceitos-chave vêm à nossa mente, mas muitas vezes de maneira confusa. Por exemplo, ao pensar no tópico Eletrostática, você pode acabar lembrando de muitas palavras, mas pode ser que elas estejam soltas na sua mente, como mostra a Figura 23, principalmente se você já viu o conteúdo há muito tempo. Saber fazer um mapa conceitual pode ajudar a organizá-los.

Figura 23 - Conceitos sobre eletrostática.



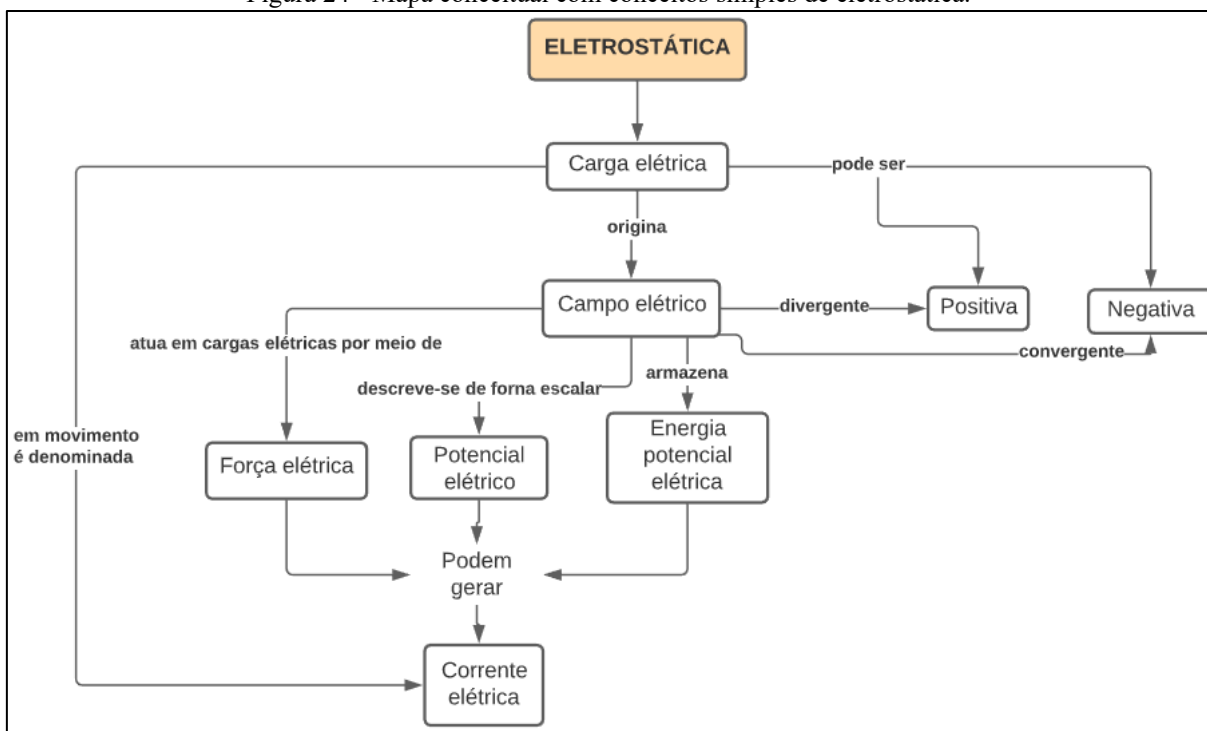
Fonte: Próprio autor.

É tanto uma forma de avaliação, quanto uma estratégia de estudo ativo que você poderá usar para qualquer outro conteúdo! Nesse sentido, o professor pode avaliar seu mapa conceitual em alguns aspectos como a disposição hierárquica, a capacidade de sintetizar conceitos e a coerência das conexões. Entretanto, se você utilizar o mapa mental como estratégia de estudo, você mesmo poderá se auto-avaliar. Por exemplo, pode ser que você conheça várias palavras ou conceitos-chave de um determinado assunto, mas será capaz de conectá-los sem olhar ou

copiar do material didático? Se não, é um sinal de que há uma lacuna neste conhecimento. Se sim, seu domínio sobre o assunto é tão bom quanto maior for a coerência das tuas ligações com a teoria.

A Figura 24 um exemplo de mapa conceitual que abrange uma parte do tópico Eletrostática, comentado anteriormente.

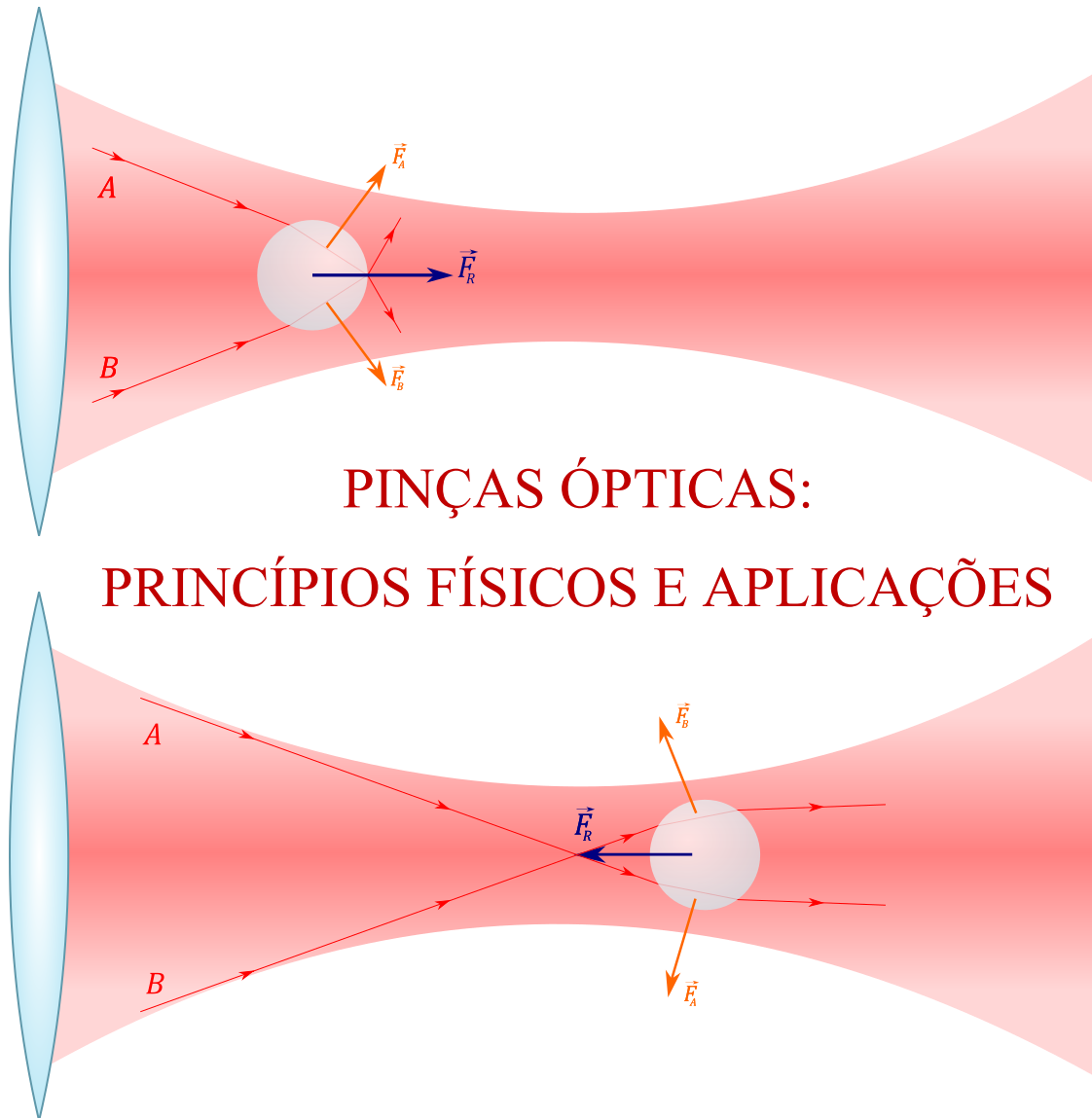
Figura 24 - Mapa conceitual com conceitos simples de eletrostática.



Fonte: Próprio autor.

Professor, os mapas conceituais apresentados nas Figuras 23 e 24 foram feitos no LucidChart, um site que permite fazer vários tipos de diagramas de forma gratuita. É necessário fazer um pequeno cadastro, mas caso ache pertinente, pode acessá-lo pelo link: <https://www.lucidchart.com>. Este vídeo possui algumas explicações sobre como montar o mapa conceitual nesta plataforma: <https://www.youtube.com/watch?v=F54SWctP7-E>.

MATERIAL DO ALUNO



PINÇAS ÓPTICAS: PRINCÍPIOS FÍSICOS E APLICAÇÕES

Autor: Pedro Schramm Ribeiro

Aula 1: Apresentação da pinça óptica e prática investigativa utilizando simulador

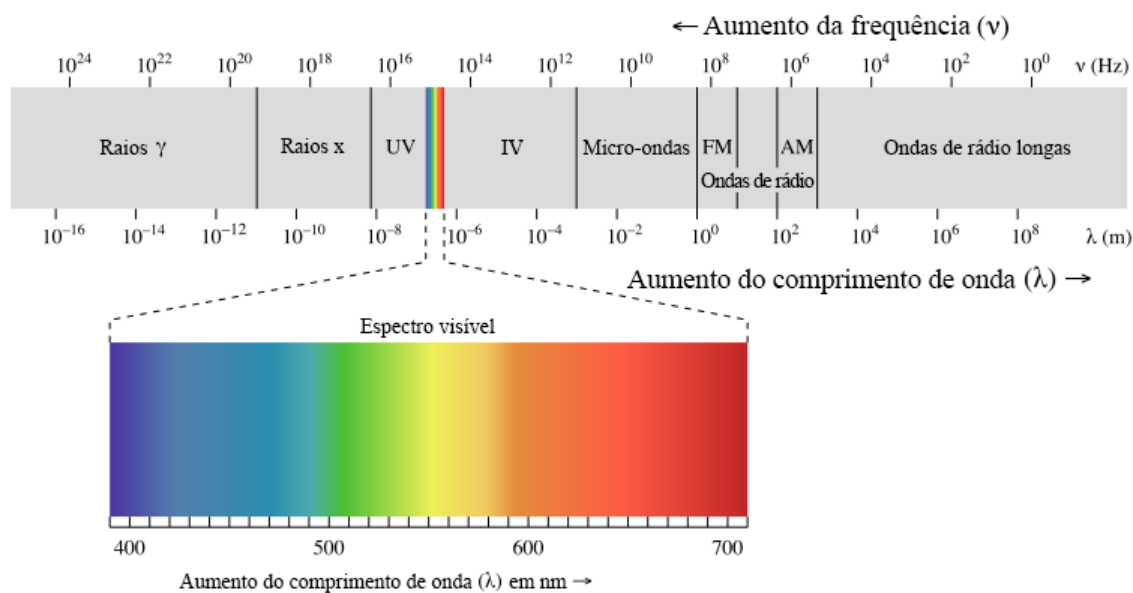
O QUE SÃO PINÇAS ÓPTICAS?

Como aprendemos durante nossa jornada no Ensino Médio, a palavra *óptica* está relacionada à luz ou radiação eletromagnética. A palavra *pinça*, por sua vez, não tem segredo: é simplesmente uma ferramenta que usamos para segurar ou puxar pequenos objetos. Nesse sentido, ao juntar as duas palavras, juntaríamos também os seus significados. Portanto, uma pinça óptica é uma ferramenta que utiliza luz para segurar, mover e aprisionar partículas. É realmente incrível, não é? Luz segurando objetos!

É importante deixar claro desde já que quando falamos de **luz**, não estamos necessariamente falando daquela que conseguimos enxergar. Lembre-se que há uma gama gigantesca de tipos de radiações que constituem o chamado **espectro eletromagnético** (Figura 1). Nós humanos só conseguimos enxergar uma pequena faixa de comprimentos de onda que chamamos de **espectro da luz visível**.

Você já deve ter percebido que qualquer tipo de radiação transporta energia. Não fosse por isso as plantas não seriam capazes de se desenvolver, uma vez que transformam a energia da luz proveniente do Sol para realizar a fotossíntese. Neste simples exemplo, temos a energia radiante sendo transformada em energia química, que é o alimento da própria planta. O que pode ser novidade para você é que a luz também pode exercer força! Esse fenômeno é chamado de **pressão de radiação**.

Figura 1 - Espectro eletromagnético.



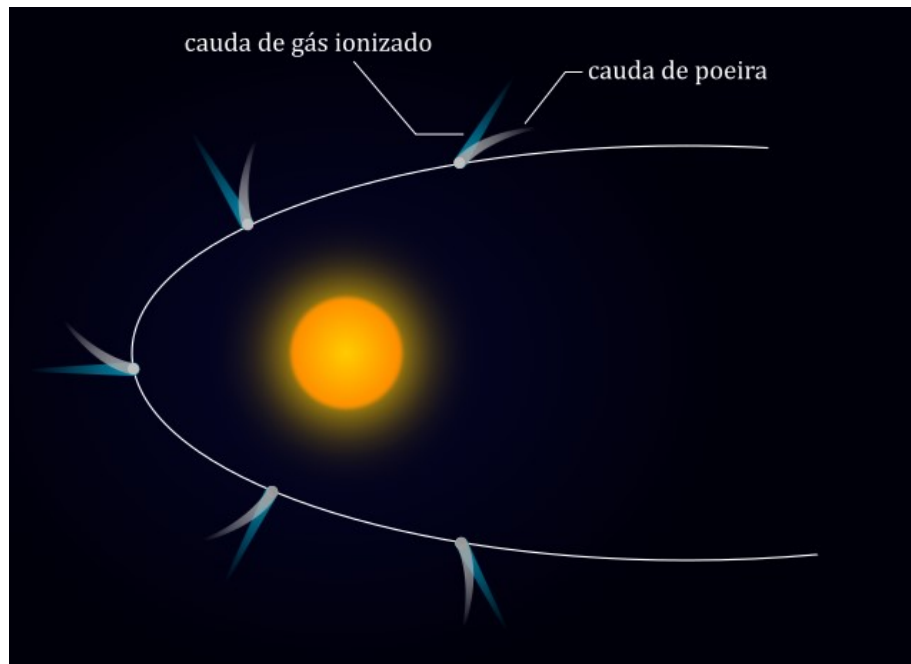
Fonte: Khan Academy¹².

Em 1619, um astrônomo alemão chamado Johannes Kepler documentou pela primeira vez essa ideia. Em seu trabalho ele relatou que, durante suas observações, percebeu que a cauda dos cometas que se aproximavam do Sol sempre apontavam em uma direção oposta à dele, como se estivessem sendo repelidas. Esta situação pode ser visualizada na Figura 2.

Kepler propôs que a radiação emitida pelo Sol exercia força sobre as partículas que constituem a cauda dos cometas e por isso elas se comportavam dessa maneira. Isso gerou muita discussão na época, mas essa previsão só foi comprovada teoricamente por James Clerk Maxwell em 1873.

¹² <https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

Figura 2 - Cometas ao redor do Sol com suas caudas sob influência da pressão de radiação.



Fonte: Próprio autor.

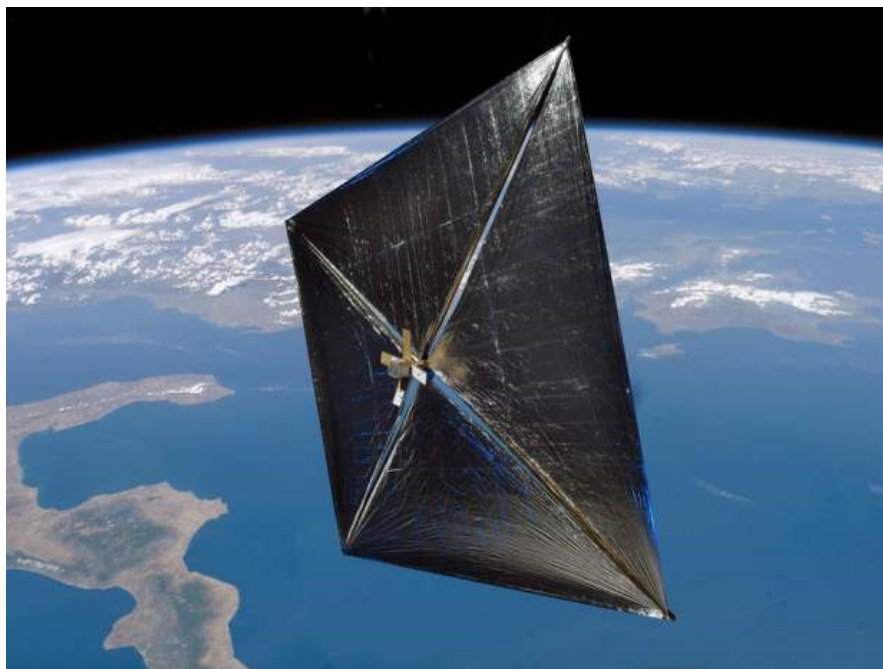
A ideia de que a radiação pode exercer pressão nos parece estranha, já que quando estamos expostos a luz não nos sentimos “pressionados pelos raios solares”. No máximo percebemos a energia térmica proveniente desta radiação queimando nossa pele. Tampouco sentimos uma força atuando sobre nossa pele quando apontamos um laser na direção dela. Mas calma, há uma explicação plausível para isso. Imagine um único grão de areia sobre sua pele e a pressão que ele exerce sobre ela. Pode-se estimar que essa pressão seja próxima de 1 Pa. Por sua vez, a pressão da radiação solar sobre sua pele é próximo de 0,00001 Pa. Cerca de cem mil vezes menor! Assim, por mais que essa pressão exista, a sensibilidade de nossa pele não é capaz de percebê-la.

É claro que a pressão da radiação aumenta de acordo com a intensidade da radiação. Isso quer dizer, por exemplo, que se utilizarmos uma lupa focalizar os raios solares em uma superfície, o ponto luminoso obtido exercerá uma pressão de radiação sobre essa superfície muito maior do que os raios não focalizados. Se podemos manipular a pressão da radiação dessa e de outras maneiras, podemos imaginar que as aplicações deste fenômeno são vastas, desde o mundo microscópico até o mundo macroscópico. Imagine você, ao mesmo tempo que usamos o momento da luz para “resfriar” átomos¹³ podemos utilizá-lo também para mover naves

¹³ Para saber mais: https://youtu.be/fAEAZaXhD_Y

espaciais com velas solares¹⁴! Na Figura 3 é possível ver uma representação de como é uma vela solar.

Figura 3 – Representação de uma vela solar (*Sunjammer*).



Fonte: Nasa¹⁵

Se você ainda não está convencido de que a luz pode interagir com a matéria de forma não fictícia, lhe convido a assistir o vídeo contido neste link:

https://www.youtube.com/watch?v=Oog-DZ_Kti4. Ele contém a demonstração do que ocorre quando uma gota de tinta é atingida por um laser focalizado.

Agora que você já sabe que a radiação tem interação com a matéria, vamos falar sobre a pinça óptica. Trata-se, como mencionado anteriormente, de uma ferramenta que utiliza luz para aprisionar pequenas partículas e guiá-las conforme a necessidade. Essa tecnologia possui algumas características peculiares e extremamente úteis. Por exemplo, a pinça óptica é controlada remotamente por meio de um computador. Isso garante grande precisão para aprisionar e movimentar as partículas.

Para ilustrar a tamanha precisão no ambiente microscópico, sugiro que veja o vídeo contido neste link: <https://www.youtube.com/watch?v=ju6wENPtXu8>. Ele mostra microesferas sendo manipuladas por um conjunto de pinças ópticas. Observe a tamanha precisão nos movimentos! Nos últimos segundos do vídeo as pinças são desligadas e as partículas passam a ter movimentos aleatórios.

¹⁴ São como velas de navios, mas que utilizam a pressão da radiação solar para acelerar.

¹⁵ https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/solarsail/index.html.

Veja que, neste sentido, a pinça óptica se mostra extremamente útil como ferramenta para pesquisas na área de Biologia. Por exemplo, microorganismos como vírus e bactérias podem ser manipulados sem a necessidade de introduzir uma ferramenta mecânica que poderia interferir no ambiente, na medida e possivelmente até destruir a amostra. Ou seja, por ser uma técnica remota (sem contato físico), a pinça óptica é estéril, isto é, livre de impurezas ao manipular objetos biológicos. Neste momento, gostaria de lhe propor uma reflexão:

“Até onde uma tecnologia de manipulação não invasiva, estéril, de alta precisão e controle remoto computadorizado pode chegar?”

Veja algumas das várias aplicações das pinças ópticas:

- Inserir DNA's dentro de diferentes tipos de células;
- Fertilização *in vitro*;
- Medição da força de miosinas cardíacas;
- Medição do comprimento e da flexibilidade de filamentos de actina e de DNA;
- Caracterização de motores biológicos moleculares;
- Atuação no interior de células de forma não destrutiva.

Entre outros.

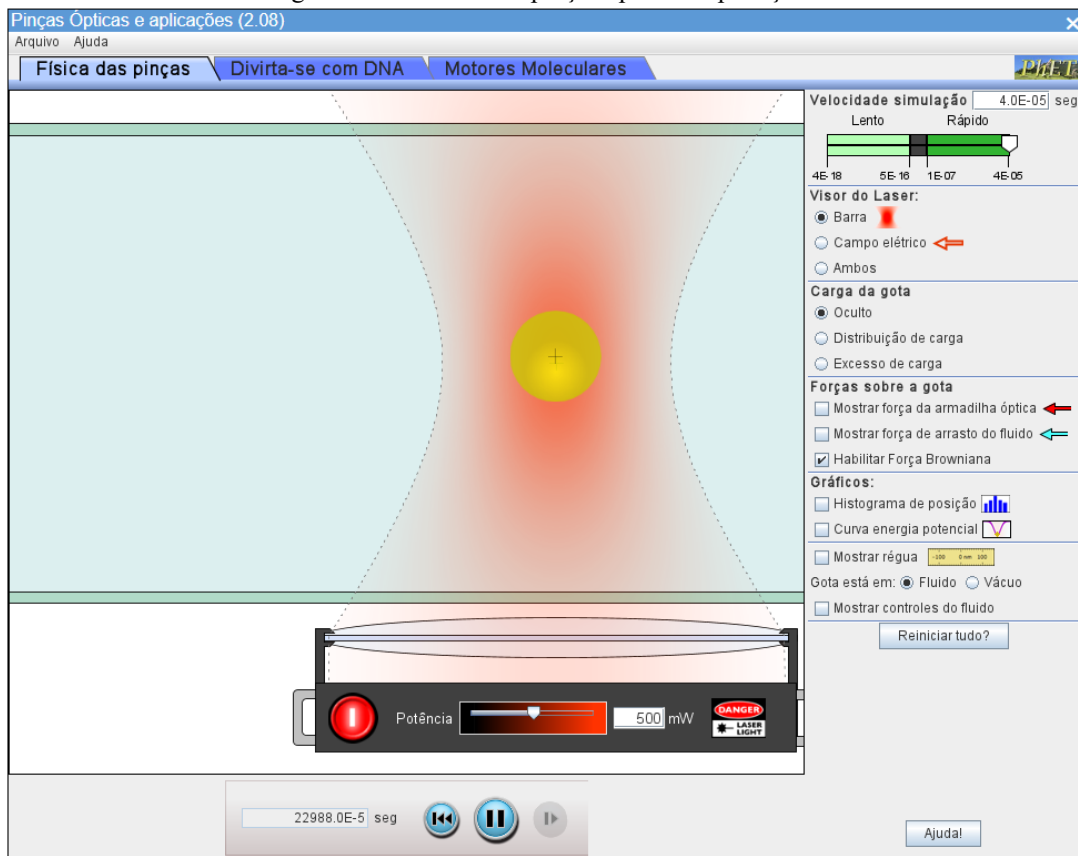
Para que você tenha uma melhor visualização de como funciona a pinça óptica, vamos mexer um pouco com um simulador.

Roteiro para utilização do simulador

É importante que você anote todas as respostas às perguntas que serão feitas, pois ao final da aula será feita uma discussão acerca dos fenômenos observados e das respostas anotadas.

1. Abra o simulador pelo site *PhET Interactive Simulations* seguindo o caminho: Simulações> Física> Pinças Ópticas e aplicações ou diretamente pelo link: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/optical-tweezers/latest/optical-tweezers.html?simulation=optical-tweezers&locale=pt_BR>

Figura 4 - Simulador de pinças ópticas e aplicações.



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.¹⁶

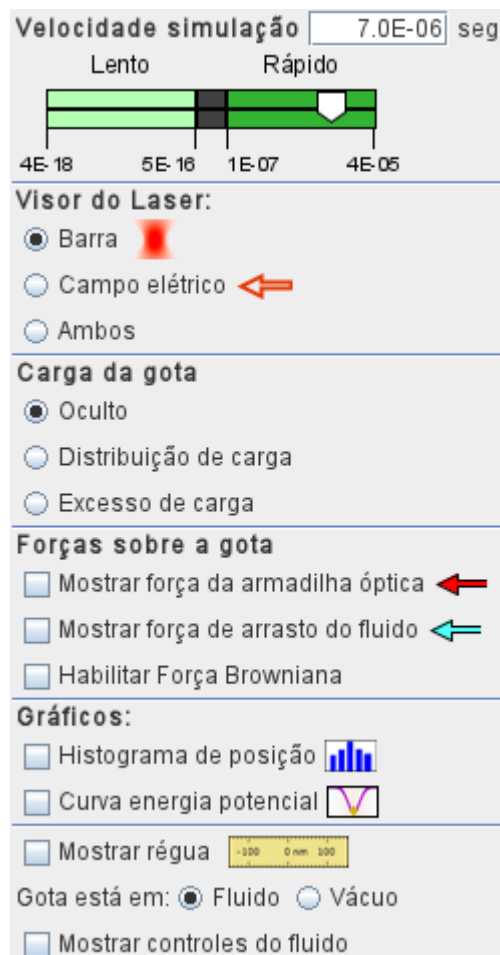
O que se vê inicialmente no simulador é uma partícula amarela, referenciada como “gota” nos controles, presa no foco de um raio laser pela força óptica. Não há qualquer

¹⁶ https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/optical-tweezers

influência de gravidade nesse simulador, mas há um fluido que envolve a partícula e resiste com força de arrasto a qualquer movimento.

2. Para obter uma melhor visualização dos fenômenos, alguns controles no lado direito podem ser alterados. *Sugestão:*
 - a) Velocidade Simulação: $7.0E-06$ seg
 - b) Visor do Laser: Barra
 - c) Carga da gota: Oculto
 - d) Forças sobre a gota: nenhuma

Figura 5 - Controles do simulador



Fonte: PhET, Universidade do Colorado.





3. Arraste a partícula e solte-a em no mínimo 3 regiões diferentes: longe do laser, fora do foco do laser, no meio do laser. O que você percebeu?
4. Ative as opções “Mostrar força de arrasto do fluido” e “Mostrar força da armadilha óptica” em **Forças sobre a gota**. Em seguida, solte a partícula em qualquer região do simulador e observe a intensidade das forças para diversas posições iniciais. Em

seguida, altere a potência do laser na parte inferior do simulador. Novamente, arraste e solte a partícula em várias posições. Responda:

a) Em qual região a força óptica é maior?

b) A intensidade da força da armadilha óptica (vermelha) é sempre igual à da força de arrasto do fluido?

c) Qual é a relação da potência do laser com a intensidade das forças observadas?

5. Pause a simulação clicando em , zere o tempo clicando em , coloque a potência do laser no máximo (1000 mW), e abra os controles do fluido em **Mostrar controles do fluido**. Você fará duas medidas de tempo: na primeira medida, a viscosidade deve possuir um valor pequeno (*Sugestão*: $5.0E-4$ Pa*sec). Arraste a partícula para qualquer região dentro do laser, mas fora do foco – quanto mais afastado melhor. Clique em  para começar a simulação e novamente em  quando a partícula parar no foco (e as forças sumirem completamente). O tempo no mostrador deve ser anotado. Para a segunda medida, deve-se repetir o procedimento, mas agora para um valor maior da viscosidade (*Sugestão*: $2.5E-3$ Pa*sec). Responda:

a) Como você explicaria, de forma qualitativa, o que é viscosidade?

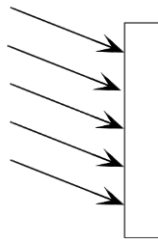
b) Qual a relação da viscosidade do fluido com o tempo que a partícula leva para se estabilizar no foco do laser? Que explicação física você daria para isso?

6. A última operação a ser realizada no simulador é a seguinte: peça para os alunos retirarem o fluido, isto é, devem clicar em **vácuo** na penúltima linha dos controles do simulador. Os alunos agora devem soltar a partícula em qualquer local dentro do laser. Eles devem anotar o que foi observado, bem como sua própria explicação, ou hipótese, para o que está acontecendo.

7. Encerradas as operações, deve-se abrir espaço para os alunos apresentarem suas respostas às perguntas feitas. Se necessário, o professor deve tirar as dúvidas remanescentes e, caso queira, comentar sobre alguns conceitos adicionais que não foram trabalhados como o movimento browniano e a curva de energia potencial.

Aula 2: Teste de conhecimentos prévios

1 – O desenho abaixo ilustra raios de luz paralelos que incidem sobre uma placa de material desconhecido. Explique o que acontece com os raios de luz ao atingirem a placa em três situações: (a) se o material for transparente; (b) se o material for metálico e polido; (c) o material for opaco de cor escura.



2 – Embora seja incomum expressar a 2ª Lei de Newton em termos da variação do momento linear em materiais didáticos do Ensino Médio, essa forma é muito utilizada em cursos de Mecânica de Ensino Superior. Com algumas simplificações podemos expressar o Princípio Fundamental da Dinâmica da seguinte maneira:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Você já havia visto esta equação? Ela está de pleno acordo matemático com a equação que você conhece?

3 – Analise a situação a seguir.

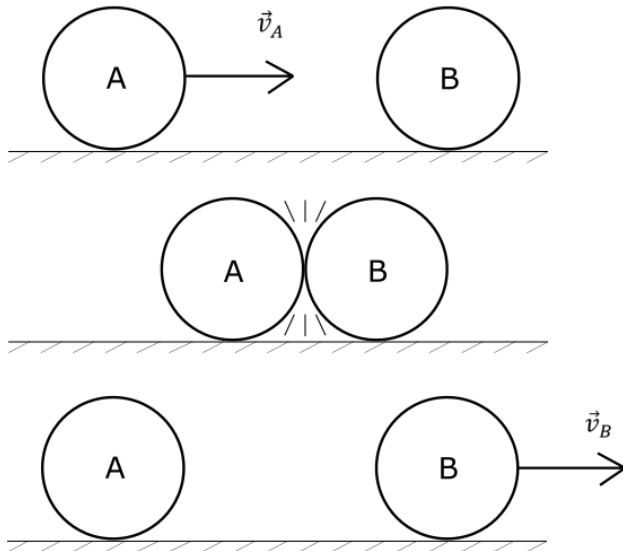
Uma pessoa está tentando quebrar telhas para testar sua força como em filmes de *kung fu*. Toda vez que soca as telhas, sente dor. Depois de várias tentativas, percebe que sua mão está com hematomas e sangramento.

Se é a pessoa que está socando, ou exercendo força, sobre a telha, por que é que a mão da pessoa sofre danos? Explique utilizando conceitos físicos.

4 – Sobre o fenômeno óptico de refração assinale o que for correto:

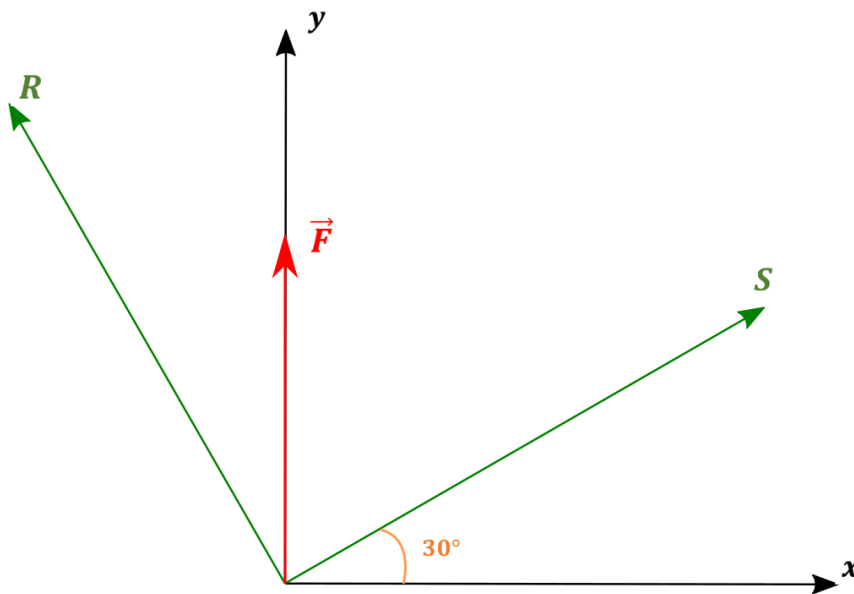
- a) Refração é o fenômeno que ocorre quando a luz passa de um meio de propagação para outro alterando a sua velocidade.
- b) Toda vez que o fenômeno de refração ocorre, a luz sofre um desvio.
- c) A grandeza que relaciona a velocidade da luz no vácuo com a velocidade de propagação da luz em determinado meio é o índice de refração. Ele pode ser entendido como a dificuldade que um meio oferece à propagação de determinado tipo de radiação.
- d) O raio de luz aproxima-se da reta normal à superfície de separação quando passa de um meio menos refrigente para um meio mais refringente.
- e) Uma lente com bordas finas tem comportamento divergente no vácuo e em qualquer outro meio no qual for imersa.

5 – A figura mostra a colisão elástica (conservativa) de duas esferas A e B sobre uma superfície sem atrito. A esfera A movimenta-se com velocidade \vec{v}_A antes da colisão e a esfera B movimenta-se com velocidade \vec{v}_B após a colisão. Sobre essa situação, são feitas algumas afirmações. Assinale o que for correto.



- Se as massas de A e B forem iguais e a esfera A permanecer em repouso após a colisão, então $\vec{v}_A = \vec{v}_B$.
- Durante a colisão, somente a esfera A exerce força na esfera B. Por este motivo, B começa a se movimentar enquanto A para.
- Se a esfera A possuir massa maior que a esfera B, ainda assim haverá conservação de energia. Entretanto, não haverá conservação de momento.
- Por ser uma grandeza escalar, a conservação do momento linear só ocorre em situações unidimensionais, como no exemplo dado.

6 – Em muitas situações, se faz necessária a criação de eixos cartesianos auxiliares. Provavelmente você já os viu quando resolveu problemas de plano inclinado. Na situação hipotética demonstrada pela figura abaixo, criou-se dois eixos auxiliares R e S , ortogonais entre si e com um deslocamento angular de 30° em relação aos eixos x e y . Deseja-se decompor a força vertical \vec{F} de módulo 10 N em duas componentes ortogonais \vec{F}_S e \vec{F}_R . Isso é possível? Se sim, quanto valem os módulos de \vec{F}_S e \vec{F}_R ?



7 – Sobre o campo da Mecânica, assinale a alternativa incorreta:

- a) Quanto maior a massa de um corpo maior é a sua inércia, isto é, maior a força necessária para alterar o seu estado de movimento.
- b) Dizer que um ponto material está em equilíbrio significa dizer que a resultante de forças que atuam nele é nula.
- c) A força resultante em um corpo pode sempre ser expressa por meio de vetores de força ortogonais entre si.
- d) Forças de ação e reação possuem intensidades iguais e atuam no mesmo corpo.

8 – O que você entende por “fótons”?

Aula 3: Leis de Newton, conservação do momento linear e fenômenos ópticos

Antes de aprendermos sobre a tecnologia da pinça óptica, precisamos ter certeza de que os conceitos fundamentais da mecânica e da ópticas necessários ao entendimento dessa tecnologia estejam bem consolidados em nossa cabeça. Por este motivo, teremos que fazer uma breve revisão sobre **Leis de Newton e Fenômenos Ópticos**. Mas fique tranquilo! Não faremos uma abordagem profunda sobre toda a mecânica e óptica, tal qual estão nos seus livros didáticos. Nos restringiremos apenas aos conceitos cruciais para atingirmos nosso objetivo.

Para entender como uma partícula se direciona para o centro de um feixe laser, primeiro precisamos entender o que faz os corpos se movimentarem em um ou noutro sentido. Assim, começaremos nossa fundamentação teórica entendendo alguns tópicos principais sobre **força e momento linear**.

AS LEIS DE NEWTON

Em seu famoso livro *Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, o matemático e físico Sir Isaac Newton (1643 – 1727) enunciou as leis do movimento que utilizamos até hoje¹⁷. Para que possamos referenciá-las mais tarde, vou colocar o enunciado dessas leis logo abaixo. Peça que leia com atenção e reflita sobre as frases:

1ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Inércia: “Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.”

2ª Lei de Newton – Princípio Fundamental da Dinâmica: “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.”

3ª Lei de Newton – Princípio da Ação e Reação: “A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.”

¹⁷ Os enunciados foram retirados do livro *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I*, traduzido da obra em inglês por tradutores da Edusp – Editora da Universidade de São Paulo.

Dependendo de seus conhecimentos prévios, a compreensão dos enunciados acima pode surgir de forma intuitiva. Mesmo assim, precisamos definir um pouco mais precisamente o conceito de **força**.

Em um primeiro momento quando pensamos em força, associamos a palavra ao esforço muscular que somos capazes de fazer. Ou então, um objeto sendo puxado ou empurrado em determinada direção. Independente da definição exata do que é uma força, a relação que é importante que se faça é a seguinte: a força é capaz de alterar o estado de movimento de um corpo. Em outras palavras, um corpo que está em repouso só irá se movimentar caso uma força não nula atue sobre ele. Da mesma maneira, um corpo que se move livremente em linha reta só pode acelerar, freiar ou realizar uma curva se uma força não nula atuar sobre ele. De forma simplificada, é isso que a Lei da Inércia nos diz.

No cotidiano, observamos esse fenômeno o tempo todo. Só podemos caminhar pois a força de atrito atua sobre nossos pés. Realizar uma curva de bicicleta só é possível porque a força de atrito atua nos pneus. Um paraquedista diminui sua velocidade de queda ao abrir o paraquedas devido à força de resistência do ar. A queda dos objetos ocorre devido à força gravitacional. Em um momento você está em repouso dentro de um avião estacionado no aeroporto, e minutos depois está a mais de 500 km/h pois o assento do avião está lhe empurrando!

O principal aqui é que você reflita sobre essas situações e entenda que a força *não é necessária para a manutenção do movimento*, como foi proposto por Aristóteles e manteve-se na mente dos filósofos e cientistas durante séculos. Entretanto, a força é necessária para que esse movimento inicie ou pare, ou de uma forma menos comum, aumente ou diminua. Falando assim, parece até que o movimento de um corpo é algo que se pode medir, não é mesmo? E realmente pode! A força tem a capacidade de aumentar ou diminuir a **quantidade de movimento** de um corpo. Em termos simples, é isso que a Lei Fundamental da Dinâmica quer dizer.

A quantidade de movimento, também chamada de momento linear, é uma grandeza física vetorial, isto é, que possui direção e sentido, com um significado pouco intuitivo para a linguagem popular. Vamos discutir um pouco sobre este conceito.

Nas palavras do próprio Newton: “A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria”. Nesse sentido, entendemos que não podemos reduzir o significado de quantidade de movimento simplesmente

à velocidade, precisamos envolver a massa do corpo também. Assim, exercer uma mesma força em objetos de massas diferentes produzirá efeitos diferentes.

Pensemos em uma situação prática. O que ocorrerá se você arremessar uma esfera de 1 kg com toda a sua força e, em seguida, lançar na mesma direção uma bola de 20 kg? Você certamente perceberá que a bola mais leve moveu-se com mais facilidade, atingindo maior distância. Primeira conclusão lógica: para a mesma força (a máxima que você tem), objetos com menor massa adquirem velocidade mais facilmente. Suponha agora que um arremessador profissional com mais força que você repita exatamente o seu processo. Você verá que, para as mesmas esferas (mesmas massas), uma força maior permitiu que elas adquirissem maior velocidade. Segunda conclusão lógica: quanto maior a força, maior a velocidade adquirida pelo objeto.

Com base no que acabamos de pensar, podemos inicialmente relembrar a definição matemática de quantidade de movimento (\vec{p}), ou momento linear:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (1)$$

em que m é a massa e \vec{v} é a velocidade do corpo. Em seguida, podemos demonstrar matematicamente a 2ª Lei de Newton:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde \vec{F}_R é a força resultante que atua no objeto e Δt é o intervalo de tempo que essa força atua no objeto.

Pode ser que você olhe a Equação 2 e pense: “Ei! Eu já aprendi sobre a Lei Fundamental da Dinâmica mas nunca vi a equação da força resultante desta forma!” Se você pensou isso, é porque conhece a forma “simplificada” dessa equação. Para a maioria dos problemas de física do Ensino Médio, consideramos que a massa do objeto não muda e por isso a consideramos constante. Com essa condição aceita, podemos manipular a Equação 2 de forma a torná-la mais familiar:

$$\vec{F}_R = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = \frac{\Delta(m \vec{v})}{\Delta t} \xrightarrow{m \rightarrow cte} \vec{F}_R = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow \vec{F}_R = m \vec{a}$$

em que \vec{a} é a aceleração adquirida pelo corpo.

A força resultante apresentada na forma da Equação 2 é de grande importância para o objetivo principal destas aulas, que é aprender o princípio de funcionamento das pinças ópticas.

Mas tenha calma, permita-me fazer um esclarecimento antes que você pense que a pinça óptica aprisiona micro-partículas diminuindo ou aumentando suas massas.

O motivo pelo qual estamos tratando a 2ª Lei de Newton com a forma da Equação 2 se dá pelo fato de que estudaremos a interação de luz e matéria. Toda radiação carrega energia e momento, mas não possui essa massa inercial m tal qual conhecemos. Nesse sentido, é muito melhor que você associe força à variação de momento em vez de associá-la ao produto de massa e aceleração.

Para concluir o nosso tópico de mecânica, vamos comentar sobre o Princípio de Ação e Reação, aplicando-o a uma situação prática. De acordo com Newton, toda vez que um corpo A faz força \vec{F}_{AB} sobre um corpo B, este corpo B reage com uma força \vec{F}_{BA} sobre o corpo A. Sobre estas forças, é importante ter em mente que:

- a) Possuem mesma intensidade, ou seja, $|\vec{F}_{AB}| = |\vec{F}_{BA}|$;
- b) Possuem a mesma direção, mas sentidos opostos. Matematicamente, $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$.

Vamos explorar este princípio em uma última situação: o choque entre duas partículas e a troca de força entre elas. Para isto, pensaremos no mecanismo de um jogo que é pura física: o bilhar (Figura 6).

Figura 6 - Mesa de bilhar



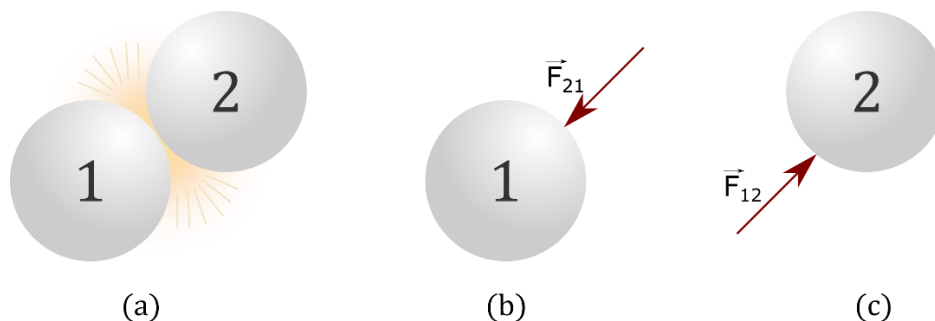
Fonte: Freepik.com

Analisaremos a situação de colisão entre duas bolas de bilhar, que chamaremos de esfera 1 e esfera 2.

Imagine que a esfera 1 colide com a esfera 2. Independentemente do estado de movimento inicial delas, sabemos que o choque promoverá trocas de forças. A reflexão é a seguinte: se a força que a esfera 1 exerce sobre a esfera 2 produz uma alteração de momento $\Delta\vec{p}_2$, então a

força que esfera 2 exerce sobre a esfera 1 produz uma variação de momento $\Delta\vec{p}_1$ no intervalo de tempo Δt que durou o choque. O esquema de forças está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - (a) Colisão entre as esferas 1 e 2; (b) força de contato na esfera 1; (c) força de contato na esfera 2



Fonte: Próprio autor.

Sendo $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ e levando em consideração que estas representam as forças resultantes que atuam nas esferas durante o choque, podemos demonstrar o que foi dito utilizando a Equação 2:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} = -\frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}_2}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{p}_1}{\Delta t} = 0 \tag{3}$$

Pense por um momento: o que a Equação 3 quer nos dizer?

De forma literal: “A soma das variações de momento linear das esferas 1 e 2 no mesmo intervalo de tempo é igual a zero.” Isso quer dizer que qualquer variação no momento linear da esfera 1 causado pela colisão implicará em uma igual variação no momento linear da esfera 2, mas em sentido contrário, de forma que a quantidade de movimento total do sistema continue a mesma de antes da colisão.

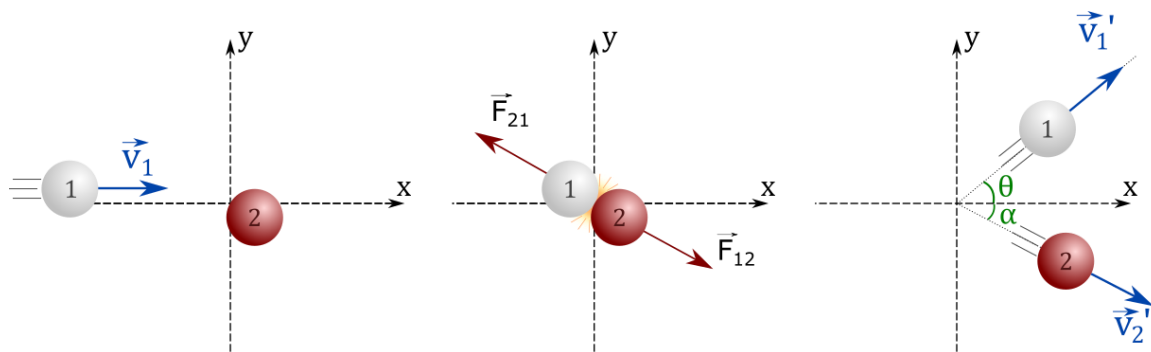
O que acabamos de entender é o que chamamos de **Princípio da Conservação do Momento Linear**, que diz que a quantidade total do momento de um sistema permanece a mesma se não houver influência de forças externas. No caso das bolas de bilhar, a única força atuante no sistema é a que surgiu durante a colisão das esferas e, sendo assim, o momento total se conservou.

Perceba que o caráter vetorial da Equação 3 mostra que o momento se conserva em todas as direções, não importa como for a colisão. Este princípio é tão relevante que mesmo

quando a massa inercial não está presente, como no caso das radiações, ele continua sendo válido.

Para finalizar este tema, observe a Figura 8.

Figura 8 - Colisão oblíqua.



Fonte: Próprio autor.

O efeito da colisão entre as duas bolas de bilhar, mesmo quando colidem obliquamente, é bem intuitivo, não é mesmo? Mas veja a beleza da Física neste exemplo. A quantidade de movimento do sistema todo está inicialmente na esfera 1 que está em movimento no sentido positivo eixo x. Após a colisão, a esfera 1 começa a movimentar-se na diagonal, com uma componente no sentido positivo do eixo y e outra no sentido positivo do eixo x. Entretanto, como o sistema é isolado, não é possível que o mesmo possua uma quantidade de movimento total na direção y, uma vez que a quantidade de movimento inicial era apenas em x. O momento linear deve se conservar tanto em módulo quanto em direção e sentido. Conseqüentemente, o que ocorre com a esfera 2? Após a colisão ela também se movimentará na diagonal, porém, além de sua componente em x, também terá uma componente em y, mas no sentido negativo! Por quê? Justamente para que esta componente da esfera 2 anule a componente em y da esfera 1. Assim, a quantidade de movimento total continuará apenas na direção positiva do eixo x. Lembre-se deste exemplo, pois ele é particularmente importante no entendimento das pinças ópticas.

Nos próximos tópicos vamos ver o que ocorre quando um raio de luz incide sobre uma superfície, mas quero aproveitar a frase anterior para desde já deixar uma reflexão:

“Sabendo que a luz carrega momento e a vela solar é composta de espelhos, quais princípios físicos estão envolvidos em sua aceleração?”

A PROJEÇÃO DE VETORES

Grandezas vetoriais são aquelas que necessitam mais do que apenas um valor e uma unidade para serem definidas, precisam também de uma direção e um sentido. Massa, por exemplo, não é uma grandeza vetorial. Ela é uma medida da inércia e da quantidade de matéria de um corpo e não depende de qualquer informação direcional. Perceba que a frase “este saco de arroz tem 5 kg” é perfeitamente definida. Não há sentido em dizer “Este cachorro tem 2 kg de massa para a esquerda e 8 kg de massa para cima”.

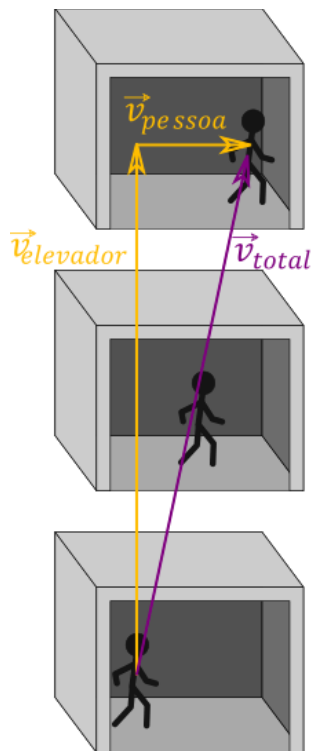
Força, como já demonstrado no tópico anterior, é uma grandeza vetorial, visto que sem definir sua direção, não há como compreender o evento. Por exemplo, imagine que uma pessoa olhe uma caixa no chão e fale: “Vou fazer força sobre esta caixa. ” Você consegue definir a ação que a pessoa irá tomar? Com certeza não. Ela pode empurrar, puxar, levantar ou até mesmo pressionar a caixa contra o chão. O efeito causado na caixa dependerá não somente da intensidade, mas da direção e sentido da aplicação dessa força. Neste mesmo raciocínio, podemos compreender o porquê de a quantidade de movimento ser uma grandeza vetorial, uma vez que ela depende da direção e sentido da velocidade do corpo.

Vetores são representações gráficas destas grandezas e possuem tamanho (intensidade), direção e sentido. Em várias situações em física precisamos da chamada **Análise Vetorial**, que consiste basicamente em analisar cada vetor em sua direção, para no final tirar alguma conclusão. Se você anda para a direita em um elevador em movimento de subida, por exemplo, qual foi efetivamente o seu deslocamento em relação à superfície da Terra? Observando a Figura 9 você percebe que terá uma velocidade vertical $\vec{v}_{elevador}$ e para cima, e uma velocidade horizontal \vec{v}_{pessoa} e para a direita. Uma forma simples de responder à pergunta é analisar cada movimento separadamente e, em seguida, uni-los utilizando geometria (Teorema de Pitágora neste caso).

Surge aqui uma pergunta: como analisar um problema cuja força ou velocidade não parecem ter “componentes”? No caso anterior, era óbvia a composição do movimento, pois uma velocidade era do elevador, outra da pessoa. Mas e se o movimento for um lançamento de um objeto qualquer, cuja velocidade é inicialmente oblíqua aos eixos vertical e horizontal e a trajetória é uma parábola? Neste caso, também iremos tratar como dois movimentos diferentes, mas como as velocidades horizontal e vertical nesse caso não são tão óbvias, utilizaremos a técnica da **Decomposição de Vetores**. Ela permite transformar o vetor velocidade, inicialmente

oblíquo, em duas componentes mais fáceis de trabalhar: uma velocidade vertical variável e uma velocidade horizontal constante.

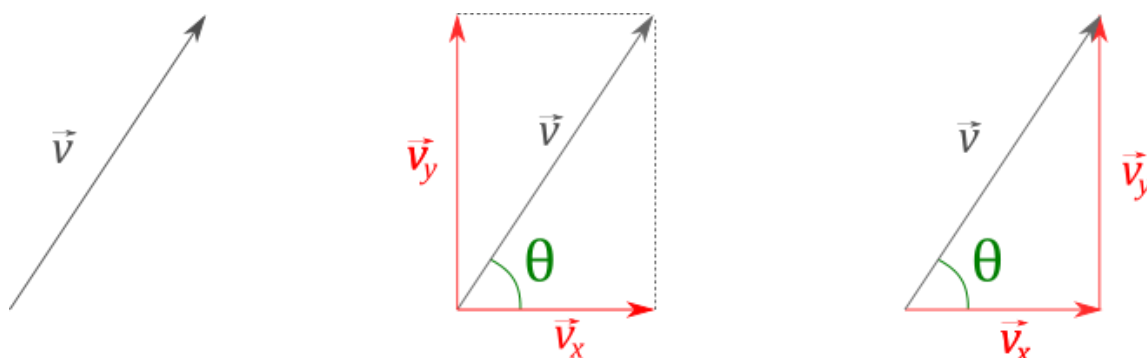
Figura 9 - Composição vetorial de movimentos em um elevador.



Fonte: Próprio autor.

Para decompor vetores, utilizamos simples trigonometria. O vetor \vec{v} da Figura 10, por exemplo, pode ser decomposto em duas componentes \vec{v}_x e \vec{v}_y utilizando as relações geométricas de seno e cosseno para um triângulo retângulo. Sendo assim, observa-se que $|\vec{v}_x| = |\vec{v}| \cos \theta$ e $|\vec{v}_y| = |\vec{v}| \sin \theta$ ¹⁸. Além disso, pode-se perceber também que $|\vec{v}|^2 = |\vec{v}_x|^2 + |\vec{v}_y|^2$.

Figura 10 - Vetor \vec{v} e suas componentes ortogonais



Fonte: Próprio autor.

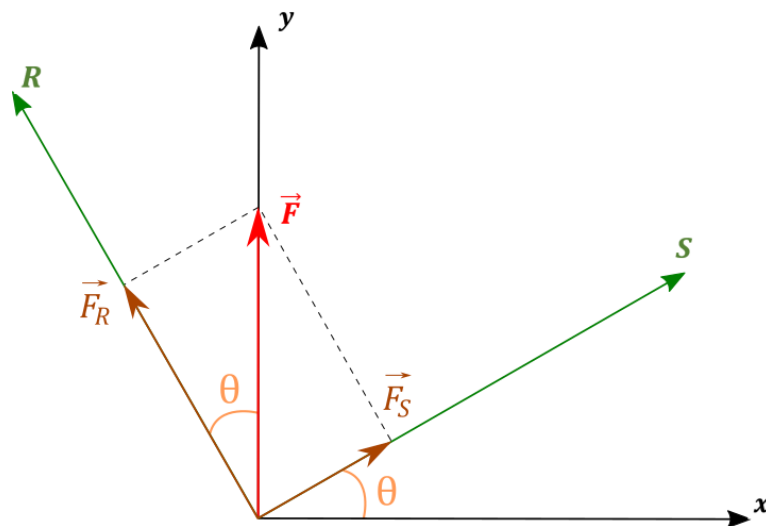
¹⁸ A simbologia de um vetor entre barras, como $|\vec{v}|$, significa “módulo do vetor”, ou seja, a intensidade ou valor da grandeza que aquele vetor representa, sem levar em consideração sua direção e sentido. Alternativamente, o módulo de um vetor pode ser representado simplesmente com a letra sem a seta. Neste caso, as equações se tornariam $v_x = v \cos \theta$ e $v_y = v \sin \theta$.

Vamos um pouco além. Existem situações em Física em que precisamos decompor um vetor em eixos auxiliares, mesmo que ele seja totalmente vertical ou horizontal. Exemplos como esse são vistos no Ensino Médio principalmente em casos de plano inclinado, onde o peso do objeto é vertical, mas como o movimento é diagonal precisamos muitas vezes decompor o vetor força-peso em duas direções perpendiculares, uma tangente e outra normal ao movimento. Você viu, um exemplo deste no teste da Aula 2. Vamos voltar a ele, mas generalizando a ideia para um ângulo θ qualquer, conforme Figura 11.

Como fazer para projetar o vetor \vec{F} nas direções das retas R e S ?

Fazendo as devidas relações geométricas, podemos perceber que o ângulo entre o eixo auxiliar R e o eixo y também é θ . As projeções de \vec{F} nos eixos auxiliares são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Componentes da força F na direção dos eixos auxiliares R e S .



Fonte: Próprio autor.

Assim, verificamos que $|\vec{F}_R| = |\vec{F}| \cdot \cos \theta$ e $|\vec{F}_S| = |\vec{F}| \cdot \sin \theta$.

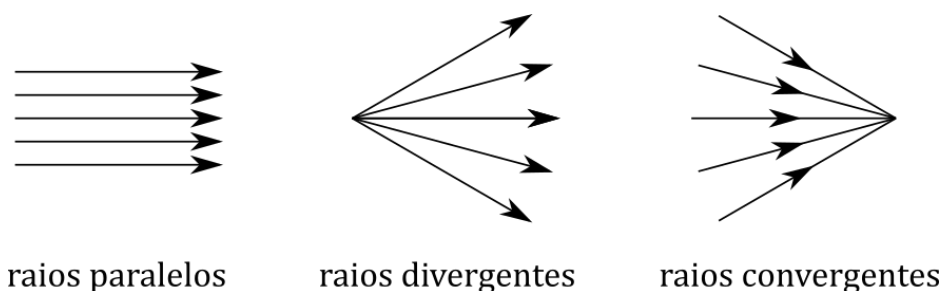
A LUZ E SEUS FENÔMENOS

Antes de tudo, vamos estabelecer alguns limites. Embora a teoria moderna da luz destaque que ela possui caráter ondulatório e corpuscular dependendo de como a observamos, iremos trabalhar aqui com o chamado limite da Óptica Geométrica. Neste limite, os efeitos mais comuns do caráter ondulatório da luz como interferência e difração serão desprezados, visto que as dimensões dos obstáculos, objetos e anteparos são muito maiores do que os

comprimentos de onda das radiações que estudaremos. A visualização destes efeitos, nestes casos, é prejudicada.

Assim, tenha em mente que a luz é realmente uma onda eletromagnética e, como tal, possui frequência e comprimento de onda, transporta energia e possui velocidade constante para um meio homogêneo. Mesmo assim, consideraremos que ela é composta de vários “raios de luz” (Figura 12) que possuem uma propagação retilínea e podem sofrer desvios ao incidir em superfícies. Com isto dito, é hora de entender alguns **fenômenos ópticos**.

Figura 12 - Representação dos raios de luz.



Fonte: Próprio autor.

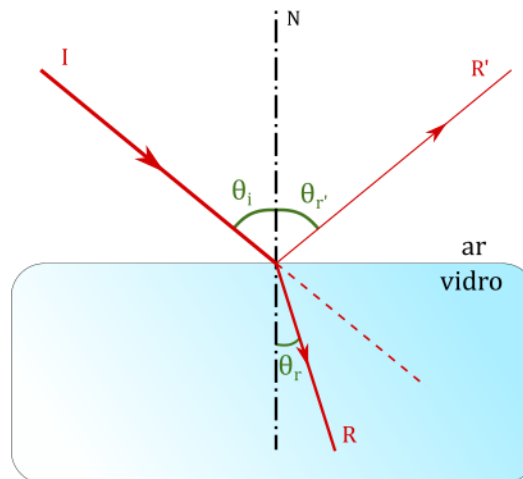
Quando a luz incide em uma superfície, três fenômenos podem ocorrer: **reflexão, refração e absorção**.

A absorção ocorre quando o raio incide em uma superfície, mas não a atravessa e tampouco volta para o meio de origem. Imagino que você saiba qual o resultado deste fenômeno. É o que acontece quando expomos nossa pele à luz solar: a superfície que absorve a radiação eleva sua temperatura e a sensação é a de que o “Sol está nos queimando”. Em geral, objetos com cores mais escuras tendem a ter uma maior absorção da radiação incidente em relação a objetos transparentes ou de cores mais claras.

Para explicar a reflexão e a refração, utilizarei um único exemplo: um raio de luz incidindo na superfície que separa o ar atmosférico de um bloco de vidro, também chamada de interface ar-vidro, com um ângulo de incidência θ_i . Se quiser, pode imaginar um raio de luz atravessando o vidro de uma janela. Se observarmos a Figura 13, perceberemos que parte do raio de luz que incide na interface (raio I) origina um raio **refletido** R' que volta ao ar e um raio **refratado** R transmitido para o vidro.

A trajetória do raio R' está de acordo com o que chamamos de Lei da Reflexão: o ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de reflexão, isto é, $\theta_i = \theta_r$. Além disso, o raio refletido deve estar contido no mesmo plano do raio incidente e da reta normal à superfície. Veja que a forma que raio refletido se comporta é simétrica e intuitiva, diferente do raio refratado, que neste caso sofre um desvio em sua trajetória.

Figura 13 - Raio de luz incidindo obliquamente na interface ar-vidro.



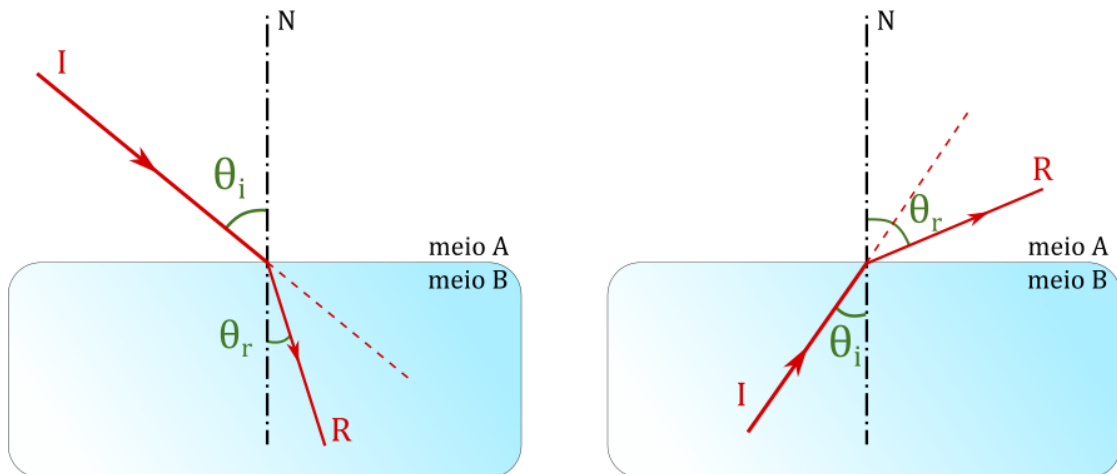
Fonte: Próprio autor.

O que ocorre na refração é que quando o raio passa para outro meio com diferentes características, sua velocidade de propagação é alterada e, dependendo do caso, sua direção de propagação também. A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz neste outro meio (v) é chamada de **índice de refração absoluto do meio**, simbolizado pela letra n como mostra a Equação 4:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

O índice de refração pode ser entendido como a dificuldade que o meio oferece à propagação de determinada radiação. Assim, quanto maior o índice de refração, menor a velocidade de propagação. Diz-se, quando um meio B possui índice de refração maior que um meio A, ou seja, $n_B > n_A$, que o meio B é **mais refringente** do que o meio A. Assim, para refrações com incidências oblíquas, temos a seguinte regra: quando um raio passa de um meio **menos** refringente para um meio **mais** refringente, sua direção é alterada de modo a se aproximar da reta normal à superfície de separação. O contrário é verdadeiro, isto é, quando um raio passa de um meio **mais** refringente para um meio **menos** refringente, sua direção é alterada de modo a se afastar da reta normal à superfície de separação. Esta regra pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Refração para $n_B > n_A$



Fonte: Próprio autor.

Não vá achando que este desvio é arbitrário. O comportamento de um raio refratado é dado por uma relação matemática conhecida como Lei de Snell-Descartes.

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (5)$$

Note que na Equação 5 os índices de refração não estão relacionados diretamente aos meios A e B, mas levam os números 1 e 2 que significam o meio de onde o raio vem e o meio para onde o raio vai, respectivamente.

Agora que você já entendeu o comportamento da luz ao incidir em uma superfície, o assunto começa a ficar mais interessante. Por quê? Vamos conectar o que acabamos de ver com o exemplo das bolas de bilhar, que vimos no tópico anterior, representado na Figura 8.

Quando a esfera 1 colide com a esfera 2, há transferência de momento linear causada pelas forças do choque. Ao mesmo tempo que a força \vec{F}_{21} reduz a quantidade de movimento da esfera 1, a força \vec{F}_{12} aumenta o momento linear da esfera 2, de acordo com a 2ª Lei de Newton. Agora pense, quando a luz incide em um espelho e é refletida em outra direção, o seu momento linear foi alterado e, como em uma colisão, a luz exerceu força no espelho!

Talvez agora você comece a compreender melhor como funciona uma vela solar: utilizando espelhos, muda-se a direção de propagação da radiação por meio da reflexão; como a radiação carrega momento, a variação deste só pode ocorrer se houver a aplicação de uma força; como reação, a radiação exerce força sobre a vela, acelerando-a.

Será que é possível aplicar esta mesma ideia para o fenômeno da refração? Sim! Enquanto a luz causa uma força de “empurrar” no corpo que a reflete, ela causará uma força de “desvio” no corpo que a refrata. Para tentar entender melhor, lembre-se do exemplo da colisão oblíqua, representada na Figura 8. Se, por exemplo, a luz é desviada para a direita, para a

conservação do momento linear, o corpo, por reação, será empurrado para a esquerda! Mas lembre-se, a intensidade da força da luz, denominada pressão de radiação, é da ordem de piconewtons. Assim, embora tenhamos chegado em conclusões incríveis quanto à relação entre os fenômenos ópticos e as leis da mecânica, não é como se os seus óculos fossem saltar do seu rosto ao refratar a luz do Sol.

Para encerrar este tópico, tentarei elucidar uma última pergunta que talvez esteja latente em sua mente: “A luz é uma onda eletromagnética; ondas não carregam matéria, apenas energia; como é possível que ela possua momento?” Bom, a resposta exata para isso é um tanto quanto complexa demais para ser explicada aqui, mas posso lhe oferecer uma maneira mais fácil de pensar. De acordo com a teoria quântica de Max Planck, a radiação não carrega energia de forma contínua, mas sim discreta. Isso significa que a energia de uma radiação se apresenta em forma de pequenos pacotes, denominados *quanta* (ou *quantum*, no singular). Anos mais tarde, Einstein propôs que esses pacotes de energia estavam associados ao comportamento corpuscular da luz, ao explicar um efeito que a teoria clássica da ondulatória não era capaz, o chamado **Efeito Fotoelétrico**. Esses pacotes de luz foram então denominados **fótons**, as “partículas de luz”. Eles não possuem massa inercial, mas possuem momento e energia, baseados em sua frequência. Assim, se você preferir, pode imaginar os raios de luz como um conjunto de muitas partículas de energia sem massa que viajam todas no mesmo sentido e, quando atingem os objetos, transferem momento.

Aula 4: Princípio de funcionamento das pinças ópticas

Agora que os conceitos necessários de mecânica e óptica já foram apresentados, chegou a grande hora: vamos entender como funcionam as pinças ópticas! É importante que você tenha em mente os fótons e os efeitos causados por eles quando incidem em uma superfície. Por falar nisso, começaremos exatamente neste assunto. Vamos aprofundar um pouco sobre o que comentamos na aula 1, o fato de a radiação conseguir exercer pressão.

A PRESSÃO DE RADIAÇÃO

Vamos fazer uma estimativa da ordem de grandeza da força que a radiação pode exercer em uma superfície. Cada fóton que compõe uma onda eletromagnética possui uma energia E dada por:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

Em que h é a constante de Planck¹⁹, f é a frequência da onda, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda associado à radiação. Note que quanto maior a frequência da radiação, maior é a energia transferida por ela. Assim, um fóton com frequência na região do infravermelho, por exemplo, possui menor energia do que na faixa da luz visível ou na faixa do ultravioleta. Esta informação será importante para compreendermos alguns efeitos que serão mencionados no decorrer da explicação, guarde-a!

É conveniente também mencionar que o momento p associado a um fóton é dado por:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (7)$$

Imaginemos uma situação em que apontamos um laser para um espelho de forma que a luz incida perpendicularmente ao plano do espelho. Podemos idealizar, para este caso, que a reflexão será total e a força exercida pela luz será a maior possível.

¹⁹ A constante de Planck, que possui valor $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s, é uma das constantes fundamentais da Física. Envolve o caráter corpuscular e ondulatório da radiação e de objetos cujas dimensões são de ordem atômica, sendo assim de importância absoluta para o desenvolvimento e estudo da Mecânica Quântica. Foi introduzida por Max Planck, um dos fundadores da teoria quântica. Em 2019, foi escolhida para ser a base na definição do quilograma (kg) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).

Pense agora na colisão dos fótons com o espelho e associe-a à 2ª Lei de Newton. Se os fótons mantiverem sua direção, mas trocarem o sentido de propagação, a única diferença entre o momento linear antes da colisão e o momento linear depois da colisão é o sinal, de modo que o módulo da força exercido sobre o espelho é descrito como:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{fóton} - (-p_{fóton})}{\Delta t} = \frac{2p_{fóton}}{\Delta t} \quad (8)$$

Realizando a devida substituição da Equação 7 na Equação 8, teremos:

$$F = \frac{2E}{c \Delta t} = \frac{2P}{c} \quad (9)$$

em que P é a potência do laser. Podemos agora, estimar a ordem de grandeza da máxima força exercida pela luz quando refletida completamente de forma ortogonal em um anteparo. Por exemplo, aquele apontador laser que o seu professor usa para destacar itens em slides durante a aula tem cerca de 3 mW de potência. A força máxima exercida por ele na superfície é de cerca de 20 piconewtons. Para que se notasse algum efeito, o objeto atingido por esta luz teria que ter uma massa muito pequena. Todavia, pode ser que você não tenha se convencido com este exemplo, já que a fonte da luz é tão “fraca”. Vou lhe dar outro exemplo.

Um estudo mostrou que a irradiação solar na cidade de São Paulo, no mês de Junho, pode chegar a 600 W/m² ao meio dia²⁰. Qual a máxima força que esta radiação pode exercer ao incidir perpendicularmente em um espelho de 1 m²? Mesmo para este valor aparentemente alto, a intensidade da força é da ordem de 4 micronewtons, que é aproximadamente o peso de um pequeno grão de areia (aproximadamente 400 ng).

Veja que a dedução matemática para a estimativa da força exercida pela radiação é relativamente simples. Entretanto, embora prevista teoricamente, a comprovação experimental da pressão de radiação é um tanto complexa, pois isolar essa variável de forma que fatores externos não influenciem na medição não é um tarefa fácil. O controle deste tipo de experimento exige precisão e controles sofisticados. A seguir lhe explicarei o porquê.

²⁰ GONZALES, R. M. P, 1998. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas** (1998).

A DESCOBERTA DAS FORÇAS ÓPTICAS

Como comentado, uma superfície pode absorver parte da radiação incidente, aumentando a sua temperatura. Por este motivo, sempre houve grande dificuldade em realizar experimentos que conseguissem medir a pressão de radiação, pois as chamadas **forças radiométricas** se faziam presentes, prejudicando os resultados. Estas forças são decorrentes, por exemplo, do movimento das massas gasosas devido à diferença de temperatura. O gás quente tende a subir por ser menos denso e o gás frio tende a descer por ser mais denso. Este tipo de movimento prejudicava qualquer medida de deslocamento causada pela incidência da radiação: “Este corpo moveu-se por ação da pressão de radiação, ou pelo movimentos das massas gasosas?”

Um exemplo de experimento que ilustra o que foi comentado é o do Radiômetro de Crookes, inventado pelo químico Sir William Crookes em 1873, e é apresentado na Figura 15. Trata-se de um bulbo de vidro preenchido com gás a baixa pressão (vácuo parcial) e hélices montadas em um eixo. Como se pode perceber, cada uma dessas hélices é pintada de cor preta de um lado e polida do outro. Ao incidir radiação sobre o radiômetro, observa-se que as hélices começam a se mover. Quanto maior a intensidade da radiação, maior a velocidade das hélices.

Figura 15 - Radiômetro de Crookes.



Fonte: Sala de Física.²¹

Segundo Crookes, o movimento das hélices se dava pelo choque dos fótons ao incidirem sobre elas. Uma explicação sedutora, porém equivocada. Pense bem, como superfícies polidas

²¹ <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/radiometro.html>

refletem mais radiação do que superfícies escuras, o momento linear que os fótons transferem ao lado polido da hélice certamente é maior do que do lado preto. Assim sendo, os fótons deveriam empurrar o lado polido para trás. Entretanto, o sentido do movimento de rotação é, na prática, o oposto do esperado! O que ocorre na realidade é que o lado de cor escura absorve maior radiação, elevando sua própria temperatura e do gás em contato com ela. Assim, o gradiente de temperatura gera correntes de convecção que promovem um movimento que empurra a parte escura da hélice para trás.

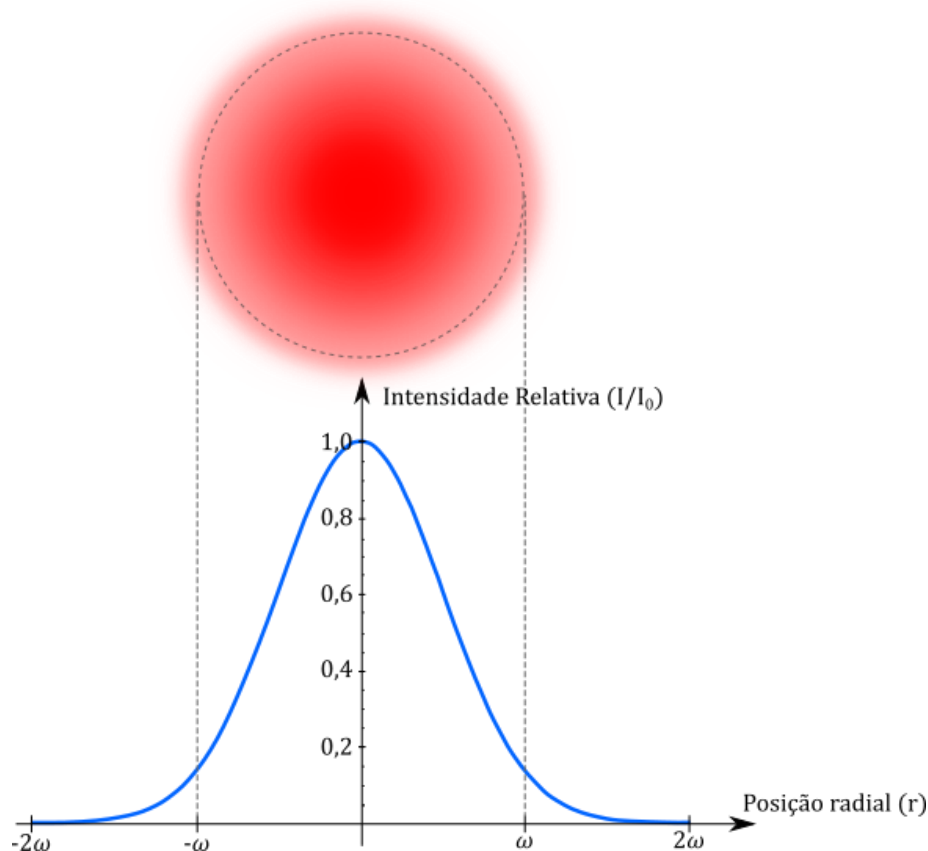
Caso você esteja intrigado, pensando que a intensidade dessas forças radiométricas é muito pequena, lembre-se que a intensidade da pressão de radiação também é! Estamos falando de intensidade de forças na ordem de nanonewtons ou piconewtons. Uma partícula que possui massa suficientemente pequena para sofrer ação de uma pressão de radiação, certamente sofre influência do movimento do fluido que compõe o meio em que a partícula se encontra. Além disso, dependendo do material que compõe a partícula, este poderia deformar-se devido à ação térmica da absorção da radiação.

Em 1969, um físico americano chamado Arthur Ashkin conseguiu driblar este problema utilizando “microesferas feitas de material relativamente transparente suspensas em um meio relativamente transparente”, segundo as palavras do próprio cientista²². Com isso, conseguiu operar livre de efeitos térmicos utilizando um laser com uma potência cerca de mil vezes maior do que os experimentos realizados na época. Mas antes de explicar exatamente o que ocorreu com o experimento de Ashkin, se faz necessário comentar algumas propriedades do laser.

Provavelmente você já viu um feixe laser e notou algumas características interessantes: potência luminosa altamente focalizada, com uma única cor e com uma direção retilínea bem definida. Uma propriedade interessante e que talvez você não saiba é que a intensidade luminosa de um feixe laser não é uniforme, isto é, os raios de luz próximos ao eixo de propagação do laser tendem a ser mais intensos. Essa variação de luminosidade pode se apresentar de maneiras diferentes, mas o laser que Ashkin usou possuía o que chamamos de **perfil gaussiano**. Na Figura 16 é apresentada a variação da intensidade luminosa de acordo com a posição radial. Note que ela é grande no centro do feixe, e diminui ao se aproximar das bordas.

²² ASHKIN, A. *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* (1970).

Figura 16 - Intensidade luminosa I/I_0 de um feixe laser com perfil gaussiano em função da posição radial r .

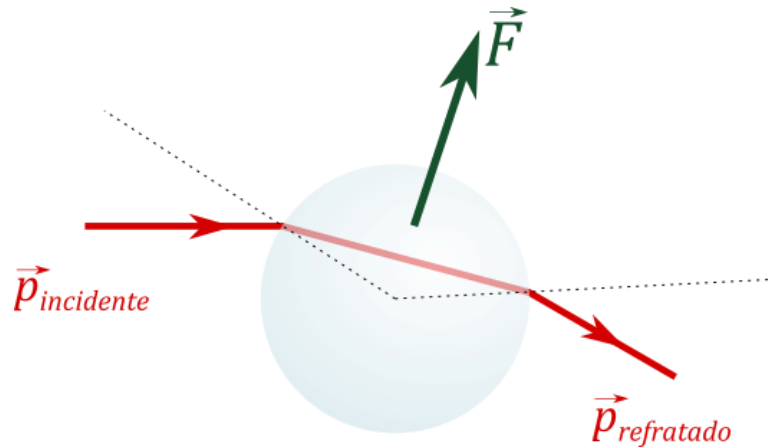


Fonte: Próprio autor.

Em seu experimento, Ashkin utilizou esferas de látex transparente suspensas livremente em água. Com apenas alguns miliwatts de potência, atingiu as partículas com um laser e observou que elas foram empurradas na direção de propagação da luz. Verificou que a velocidade que elas adquiriram estava aproximadamente de acordo com a estimativa da teoria, sugerindo que o efeito fosse realmente devido à pressão de radiação. Mas algo incrível aconteceu: uma força não prevista surgiu, puxando as partículas que estavam na borda do feixe para a região de maior intensidade. Isso significa que as partículas não só estavam sendo empurradas na direção do feixe laser, como sendo atraídas para o centro deste. Mesmo movimentando o laser de um lado para outro, as partículas continuavam sendo atraídas para seu centro. As partículas estavam sendo guiadas pela luz!

Neste momento, surge uma pergunta: esta força transversal seria também resultado da pressão de radiação? Para respondê-la, vamos utilizar todos os conceitos aprendidos na aula 3. Observe a Figura 17, que mostra o que ocorre quando um raio de luz atinge uma esfera transparente com índice de refração superior ao meio onde está imersa.

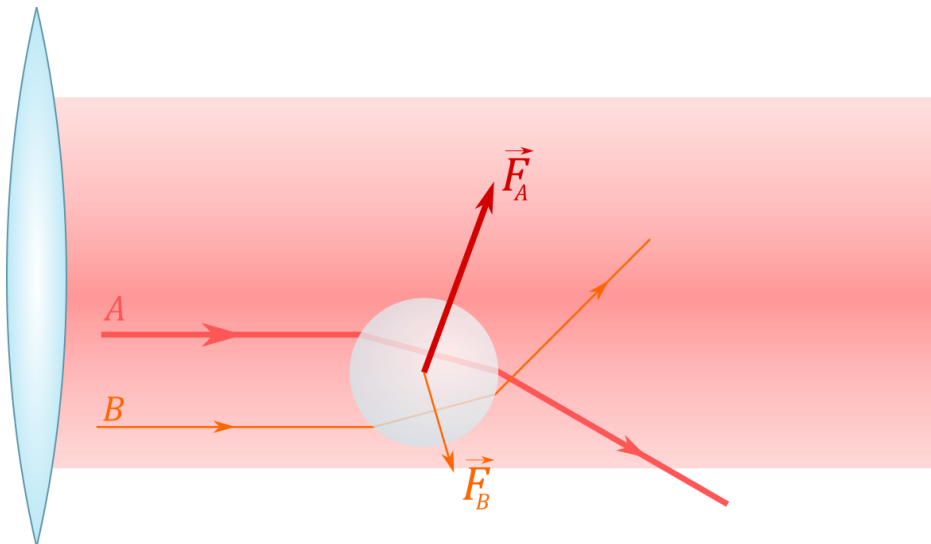
Figura 17 - Refração de um raio de luz em uma esfera de material transparente.



Fonte: Próprio autor.

Note que quando o raio de luz desvia, podemos interpretar que os fótons que o compõe tiveram a direção do seu momento linear alterado e, assim como no exemplo da colisão oblíqua das bolas de bilhar, a conservação do momento exige o surgimento de uma força na esfera para compensar esse desvio. Todavia, considerando que o laser é composto de vários raios de luz que incidem sobre a esfera, como isso explica o movimento verificado no experimento de Ashkin? Para entendê-lo, observe agora a Figura 18, que ilustra uma esfera sendo atingida por dois raios A e B arbitrários, paralelos entre si, representando a interação entre a luz do laser e a partícula. Note que a esfera encontra-se em uma região de influência do laser, mas fora do centro deste.

Figura 18 - Esquema de forças na esfera em razão dos raios refratados.



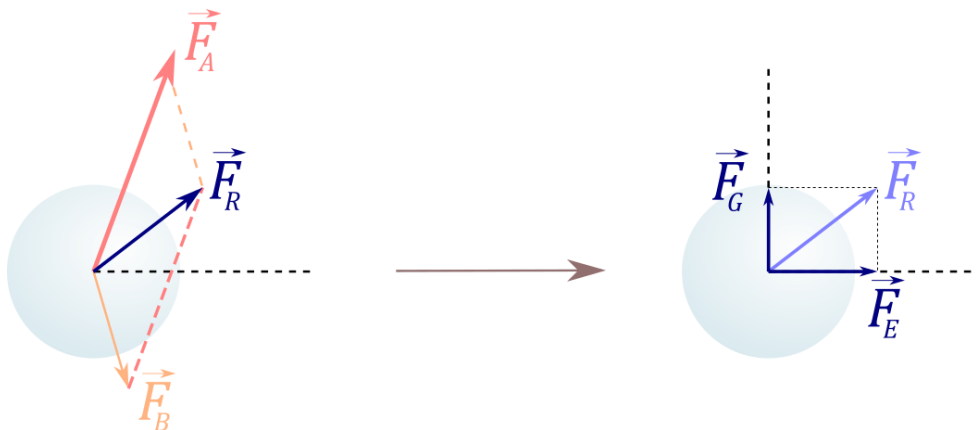
Fonte: Próprio autor.

A refração dos raios na esfera faz com que duas forças \vec{F}_A e \vec{F}_B apareçam como explicado anteriormente. Talvez você esteja se perguntando: “Mas por que a força que puxa a partícula

para o centro do feixe laser é maior do que a força que empurra ela para fora?” Em outras palavras, por que $|\vec{F}_A| > |\vec{F}_B|$?

Lembre-se do perfil gaussiano do feixe laser! Quanto maior a intensidade luminosa, maior a quantidade de fótons que compõe os raios de luz daquela região. Assim, como o raio A está em uma região de maior intensidade luminosa, a força produzida por seu desvio é, por consequência, maior. Note também que a resultante destas duas forças, que podemos chamar de **força óptica resultante** \vec{F}_R , pode ser projetada em eixos ortogonais entre si, facilitando assim nosso discernimento com relação aos efeitos. A Figura 19 mostra a força óptica resultante com uma componente na direção de propagação do feixe e outra na direção radial do feixe. A primeira recebe o nome de **força de espalhamento** \vec{F}_E (traduzida do inglês, *scattering force*) e a segunda é denominada **força de gradiente** \vec{F}_G , justamente porque surge devido ao gradiente de intensidades do feixe laser.

Figura 19 - Componentes da força óptica.



Fonte: Próprio autor.

Há algo interessante a ser mencionado: as esferas utilizadas por Ashkin possuíam índice de refração superior ao meio em que estavam imersas. O látex possui índice de refração absoluto $n_{\text{látex}} \approx 1,58$ para a radiação utilizada, e a água, $n_{\text{água}} \approx 1,33$. Assim, você pode verificar que os desvios observados estavam de acordo com o que vimos na aula sobre refração da luz. Tome nota: a reta normal a uma superfície esférica é sempre coincidente com o centro da esfera. Talvez agora fique mais fácil verificar a Lei de Snell.

Antes de prosseguir, pense um pouco sobre a seguinte pergunta:

“O que ocorreria se realizássemos a mesma experiência, mas com esferas cujo índice de refração fosse menor do que o meio onde estariam suspensas?”

Pode ser que a sua resposta intuitiva tenha sido a mesma de Ashkin. Ele realizou um experimento para comprová-la. Disparou um feixe laser contra bolhas de ar produzidas pela agitação de uma mistura de glicerol e água. Como você provavelmente deve ter pensado, o efeito foi justamente o oposto do experimento anterior: as bolhas atingidas pelo laser foram expulsas da região de maior intensidade, como se estivessem sendo repelidas.

A seguir, comentarei um pouco sobre o desenvolvimento das pinças ópticas ao longo do tempo e quais os desafios enfrentados em suas aplicações contemporâneas. Para finalizar este tópico, deixo duas questões para que possa refletir e avaliar os conhecimentos obtidos:

- 1) Por que as partículas usadas nos experimentos precisam ser transparentes?

- 2) O que ocorreria se as partículas estivessem no vácuo?

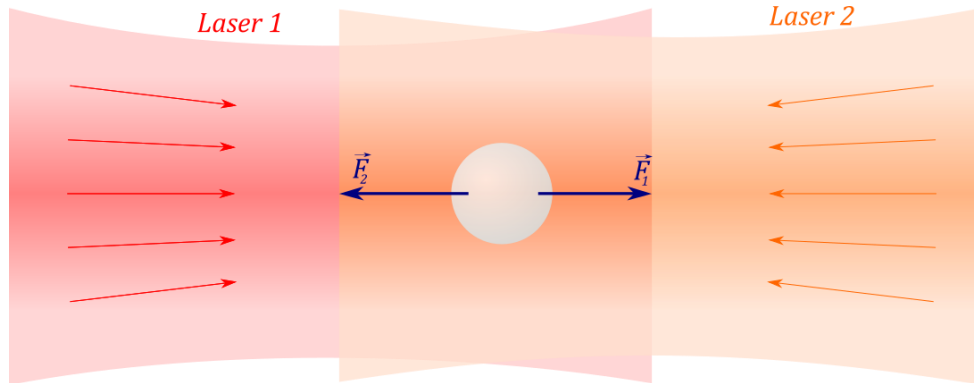
AS PINÇAS ÓPTICAS

Variados estudos e experimentos foram realizados e muitos trabalhos foram publicados a partir do que foi descoberto por Ashkin, mas vamos nos ater aos que levaram ao desenvolvimento da tecnologia das pinças ópticas.

Inicialmente, lembre que as partículas são atraídas para o centro do feixe laser pela força de gradiente, mas este não é o único efeito. A força de espalhamento empurra as partículas até que elas colidam com o anteparo da câmara onde estão confinadas. O que poderia ser feito para que as partículas pudessem se manter “aprisionadas” pelo feixe laser, sem qualquer tipo de deslocamento? De uma forma de bem simples, você pode pensar que para anular uma força que aponta para a esquerda, precisamos de uma força que seja de igual intensidade mas que aponte para a direita. Nesse sentido, acabamos de desvender como Ashkin criou o primeiro modelo de uma armadilha óptica tridimensional. Este modelo recebeu o nome de *2-BEAM TRAP* e consiste basicamente em atingir a partícula suspensa com dois feixes laser levemente

focalizados, com mesma potência, mesmas dimensões e com sentidos opostos, com o objetivo de anular a força de espalhamento (Figura 20).

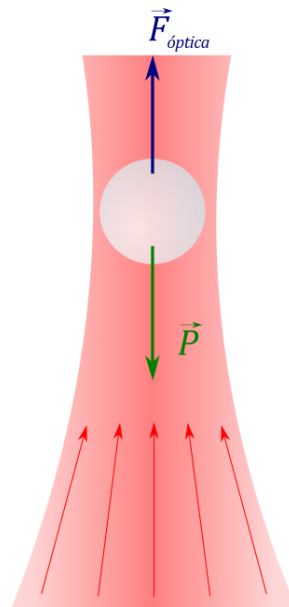
Figura 20 - Armadilha óptica constituída por dois feixes laser.



Fonte: Próprio autor.

Outro experimento muito interessante foi a levitação de pequenas partículas utilizando a força da pressão de radiação e a estabilidade oferecida pela força de gradiente. Contrapondo o peso da partícula com a força de espalhamento, as partículas podiam ser manipuladas livremente simplesmente movendo o feixe laser (Figura 21).

Figura 21 - Partícula levitando sob ação exclusiva da pressão de radiação.

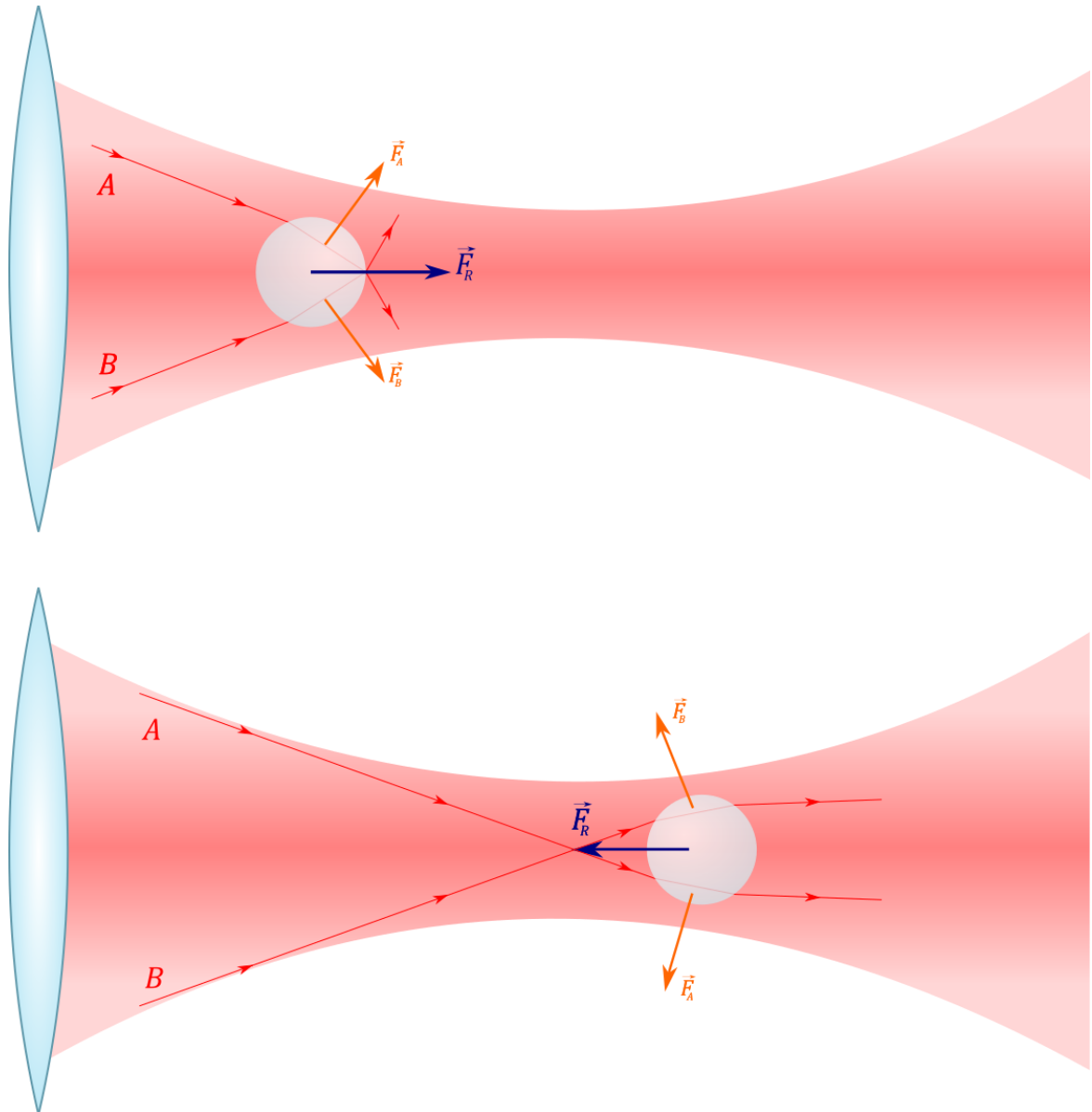


Fonte: Próprio autor.

Finalmente, em 1986, Ashkin publica um artigo revelando a observação da armadilha óptica tridimensional a partir de um único feixe laser! Como seria possível? Utilizando um laser altamente focalizado, as forças ópticas que atuam na partícula tendem a levá-la sempre à região de maior intensidade luminosa que, neste caso, é exatamente no ponto focal do laser.

A Figura 22 mostra como a partícula é sempre direcionada para o mesmo ponto, independentemente de estar à frente ou atrás do foco do laser. Observe bem os desvios causados nos raios devido à refração e o surgimento das forças ópticas. Perceba que estão todos de acordo com as explicações dadas anteriormente. Este é o modelo do que chamamos hoje de **pinças ópticas**, uma ferramenta de luz que, com um único feixe laser, pode manipular partículas.

Figura 22 - Modelo de pinças ópticas utilizando um único feixe focalizado.



Fonte: Próprio autor.

Veja que, alterando o foco da lente, podemos mover a partícula para frente ou para trás. Alterando a potência do laser, podemos exercer maior ou menor força nas partículas. Este último efeito você deve ter notado ao utilizar o simulador na aula 1.

Em 2018, Ashkin recebeu o prêmio Nobel de Física pela invenção das pinças ópticas e por suas aplicações nas ciências biológicas.

PINÇAMENTO ÓPTICO EM SISTEMAS BIOLÓGICOS

Como comentamos na aula 1, a pinça óptica tem sido muito utilizada em ambientes microscópicos para estudar sistemas biológicos. Com ela é possível medir propriedades mecânicas de microorganismos e células, além de outros sistemas. Já imaginou poder desenrolar uma molécula de DNA e testá-la para verificar qual sua resistência mecânica? A pinça óptica permitiu este estudo, além de outros como manipulação de bactérias e vírus!

No entanto, é importante que entenda que nem tudo é tão simples e alguns cuidados precisam ser tomados. Lembre-se dos fenômenos ópticos: o que ocorre quando a radiação atinge uma superfície? Reflexão, refração e/ou absorção. Este último merece uma atenção especial quando falamos de sistemas biológicos, pois estamos tratando de radiação altamente focalizada atingindo objetos que não são totalmente transparentes. Assim, os efeitos térmicos produzidos pela absorção não podem ser desprezados.

Aprendemos em nossa jornada no Ensino Médio que cada material possui uma “preferência de absorção” para cada tipo de radiação. As folhas das plantas, por exemplo, possuem grande absorção das frequências na faixa da luz visível, exceto na cor verde que é em grande parte refletida. Assim, como sistemas biológicos são compostos de uma variedade de materiais, a escolha do laser correto é um grande desafio, pois a absorção da maioria das substâncias presentes deve ser mínima para que a temperatura do sistema não se eleve de forma considerável, aumentando assim o risco de destruir a amostra.

As radiações com comprimentos de onda entre 800 a 1300 nm estão na faixa do infravermelho e possuem baixa absorção para a maioria dos materiais biológicos. Nesse sentido, um dos tipos de laser preferidos para estes tipos de aplicações é o Nd:YAG emitindo em 1064 nm.

Aula 5: Avaliação dos conhecimentos adquiridos

Este material tem como objetivo principal lhe mostrar como é possível, dentro de certos limites teóricos, entender o funcionamento das pinças ópticas com os conceitos de física básica aprendidos ao longo de sua jornada no Ensino Médio. Mas não há como saber se este objetivo foi alcançado ao longo das aulas sem realizar algum tipo de avaliação. O que vou lhe propor baseia-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e finalizará com chave de ouro a nossa sequência de aulas.

Ausubel foi um grande psicólogo da educação e teórico da área de aprendizagem que, como dito, criou um conceito conhecido como Aprendizagem Significativa. Consiste, de forma prática, em um aprendizado que não será esquecido em pouco tempo. Isso porque o principal objetivo deste aprendizado é fazer com que os novos conhecimentos não entrem de forma aleatória na cabeça do aprendiz, mas sejam agregados à sua estrutura cognitiva pré-existente. Se ficou muito confuso, pense no seguinte: seria possível aprender Conservação do Momento Linear sem ao menos saber o que são vetores? Ou ainda, aprender como funcionam os motores térmicos sem conhecer o comportamento dos gases? Talvez de forma mecânica sim, mas é um conhecimento que, após poucos dias, seria completamente esquecido.

Neste sentido, a sequência de aulas foi montada para que antes de entender as pinças ópticas, você obtivesse todo o fundamento teórico para ser capaz de compreender os fenômenos envolvidos! Mesmo assim, não é como mágica, determinados conceitos precisam de um pouco mais de esforço e repetição pra que possamos compreendê-los. É assim, por exemplo, com a dualidade onda-partícula da luz que gera tantas interrogações na cabeça dos alunos.

A avaliação será composta por duas atividades:

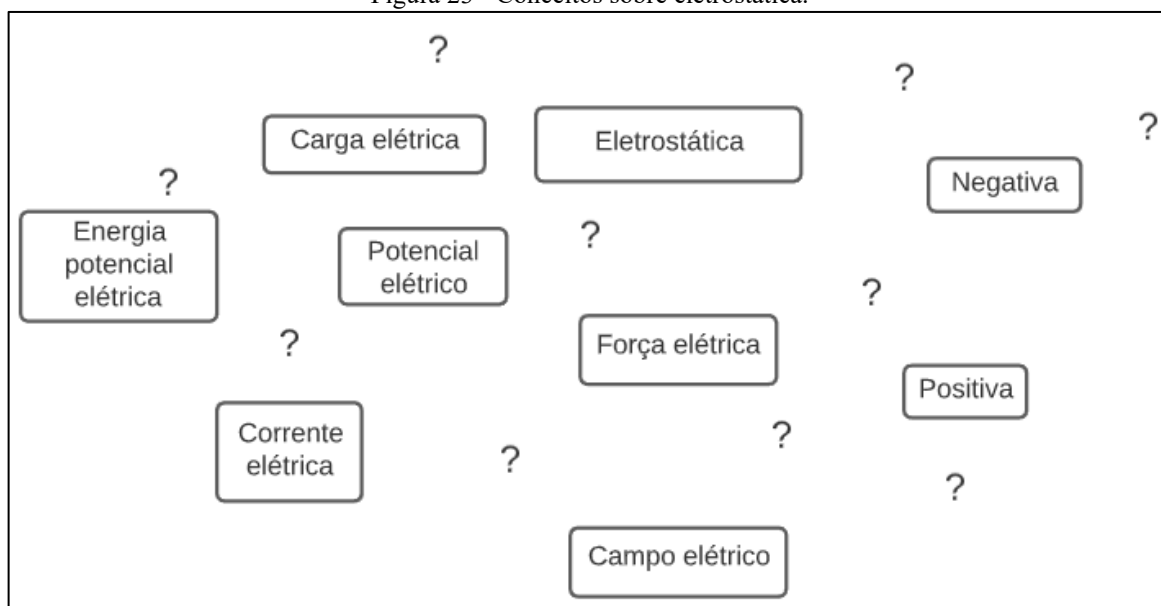
- 1) Descreva, com suas palavras, como ocorre o fenômeno do pinçamento óptico descoberto por Arthur Ashkin. O seu texto deve, preferencialmente, possuir figuras que auxiliem a sua explicação. Não há necessidade de explicar cada um dos modelos de pinça óptica. Escolha uma das configurações ilustradas na Aula 4 e comente sobre o motivo do surgimento das forças.
- 2) Construa um mapa conceitual com os temas Mecânica e Óptica no topo da hierarquia. Escolhendo alguns conceitos-chave, desenvolva o mapa até uni-los ao final em uma caixa com o escrito “Pinças Ópticas”.

Caso você não saiba o que é um mapa conceitual, não se preocupe, pois a seguir lhe explicarei e mostrarei como esta ferramenta se mostra efetiva como forma de avaliação e técnica de estudo.

Mapas conceituais são diagramas organizados de forma hierárquica e que busca mostrar conexões entre conceitos e ideias. Não deve, porém, ser confundido com diagramas de fluxo ou organogramas, pois devem ser desprovidos de temporalidade e sequencialidade. Neste sentido, o caráter hierárquico de um mapa conceitual refere-se à abrangência dos conceitos, sendo que os conceitos mais gerais se localizam na parte superior os conceitos mais específicos na parte inferior.

O que acontece geralmente quando pensamos em um assunto, vários conceitos-chave vêm à nossa mente, mas muitas vezes de maneira confusa. Por exemplo, ao pensar no tópico Eletrostática, você pode acabar lembrando de muitas palavras, mas pode ser que elas estejam soltas na sua mente, como mostra a Figura 23, principalmente se você já viu o conteúdo há muito tempo. Saber fazer um mapa conceitual pode ajudar a organizá-los.

Figura 23 - Conceitos sobre eletrostática.



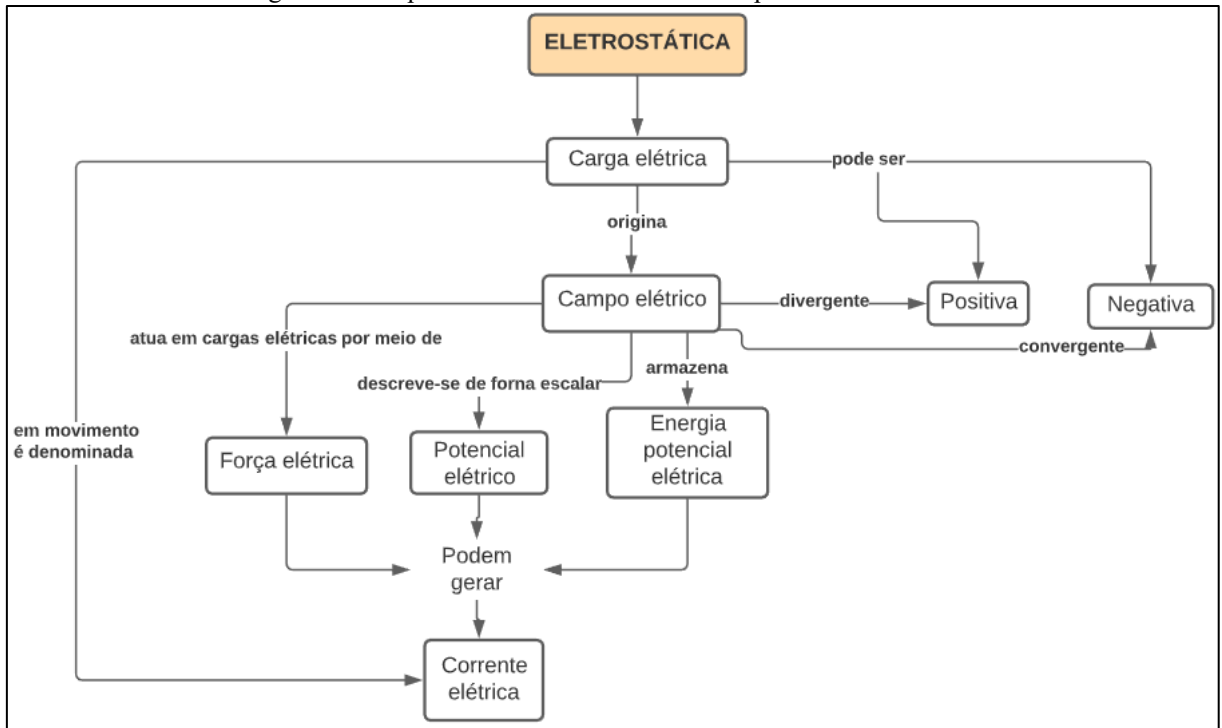
Fonte: Próprio autor.

É tanto uma forma de avaliação, quanto uma estratégia de estudo ativo que você poderá usar para qualquer outro conteúdo! Nesse sentido, o professor pode avaliar seu mapa conceitual em alguns aspectos como a disposição hierárquica, a capacidade de sintetizar conceitos e a coerência das conexões. Entretanto, se você utilizar o mapa mental como estratégia de estudo, você mesmo poderá se auto-avaliar. Por exemplo, pode ser que você conheça várias palavras ou conceitos-chave de um determinado assunto, mas será capaz de conectá-los sem olhar ou

copiar do material didático? Se não, é um sinal de que há uma lacuna neste conhecimento. Se sim, seu domínio sobre o assunto é tão bom quanto maior for a coerência das tuas ligações com a teoria.

A Figura 24 um exemplo de mapa conceitual que abrange uma parte do tópico Eletrostática, comentado anteriormente.

Figura 24 - Mapa conceitual com conceitos simples de eletrostática.



Fonte: Próprio autor.

REFERÊNCIAS

- ASHKIN, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. **Physical Review Letters**, vol. 24, n. 4, 1970.
- ASHKIN, A. History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atoms, and Molecules. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, vol.6, n. 6, 2000.
- ASHKIN, A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. **Proceedings of the National Academy of Sciences of USA**, vol. 94, p. 4853-4860, 1997.
- ASHKIN, A.; DZIEDZIC, J. M.; BJORKHOLM, J. E.; CHU, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. **Optics Letters**, vol. 11, n. 5, 1986.
- FEYNMAN R., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. L. **The Feynman Lectures on Physics**. Vol. I. Ed. Addison-Wesley, 2010.
- GONZALES, R. M. P. **Estudo do efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera em aplicações fotovoltaicas**. Insitituto de Física – Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- POŽAR, T., LALOŠ, J., BABNIK, A. *et al.* Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light. **Nat Commun** **9**, 3340 (2018).
- NEVES, A. A. R. **Força Óptica em Pinças Ópticas: Estudo Teórico e Experimental**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física Gleb Wataghin. Campinas, São Paulo, 2006.
- NUSSENZVEIG, H. M.. **Curso de Física Básica 4: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1998. v. 01. 437p.
- NUSSENZVEIG, H. M.. **Curso de Física Basica I: Mecânica**. Edgard blucher, São Paulo, 1981.