

ENSINANDO NANOTECNOLOGIA NO ENSINO MÉDIO: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL COM CRISTAIS LÍQUIDOS TERMOTRÓPICOS

Teaching nanotechnology in high school: an experimental approach using thermotropic liquid crystals

Rodnil da Silva Moreira Lisboa [rodnil.silva@ufabc.edu.br]

Jean Jacques Bonvent [jean.bonvent@ufabc.edu.br]

Universidade Federal do ABC

Av. dos Estados, 5001 – Bangu, Santo André, São Paulo, Brasil

Recebido em: 30/12/2025

Aceito em: 29/03,2026

Resumo

Apesar de sua ampla presença em tecnologias do cotidiano, a nanotecnologia ainda é pouco abordada no ensino médio, especialmente no contexto da Física escolar. Este trabalho apresenta uma proposta didática que integra o uso de uma plataforma digital educacional com uma atividade experimental baseada na construção e experimentação de um display de cristal líquido termotrópico. A abordagem foi aplicada em uma oficina com estudantes do 2º ano do ensino médio, estruturada a partir da metodologia da sala de aula invertida e fundamentada na teoria da aprendizagem significativa. A atividade possibilitou a exploração de conceitos da Física contemporânea, como anisotropia óptica, mesofases e transições de fase, relacionando-os a aplicações tecnológicas presentes em dispositivos do cotidiano, como telas de LCD. A proposta evidencia a viabilidade da inserção de temas de nanotecnologia no ensino médio por meio de atividades experimentais acessíveis, mesmo em contextos escolares com recursos limitados.

Palavras-chave: Ensino de Física; Nanotecnologia; Cristais líquidos; Aprendizagem significativa.

Abstract

Despite its widespread presence in everyday technologies, nanotechnology is still scarcely addressed in high school education, particularly within the context of school physics. This paper presents a didactic proposal that integrates the use of a digital educational platform with an experimental activity based on the construction and experimentation of a thermotropic liquid crystal display. The approach was implemented through a workshop with second-year high school students and was structured according to the flipped classroom methodology, grounded in the theory of meaningful learning. The activity enabled the exploration of concepts from contemporary physics, such as optical anisotropy, mesophases, and phase transitions, relating them to technological applications commonly found in everyday devices, such as LCD screens. The proposal highlights the feasibility of introducing nanotechnology topics in high school education through accessible experimental activities, even in school contexts with limited resources.

Keywords: Physics education; Nanotechnology; Liquid crystals; Meaningful learning.

1. Introdução

A busca por estratégias mais adequadas para o ensino de Física no ensino médio tem ocupado espaço significativo nos debates educacionais contemporâneos. De modo geral, aponta-se a necessidade de práticas pedagógicas que aproximem os conteúdos escolares das experiências cotidianas dos estudantes, reduzindo o caráter excessivamente abstrato frequentemente associado à disciplina. Embora os alunos mantenham contato constante com tecnologias como computadores, televisores, tablets e smartphones, raramente conseguem relacionar os princípios físicos estudados em sala de aula com o funcionamento desses dispositivos. Essa dificuldade evidencia uma defasagem persistente entre o conteúdo tradicionalmente trabalhado no ensino médio e os temas da Física moderna e contemporânea, amplamente presentes no cotidiano dos alunos.

Nesse contexto, o estudo da nanotecnologia apresenta-se como uma possibilidade concreta de aproximação entre a Física escolar e aplicações tecnológicas reais, uma vez que trata de fenômenos físicos em escala nanométrica cujas consequências se manifestam em nível macroscópico. Entre os sistemas físicos associados a essa área, destacam-se os cristais líquidos, cujas moléculas apresentam dimensões e interações características da escala nanométrica.

De acordo com Bechtold (2005), esses materiais possuem propriedades ópticas e dielétricas anisotrópicas, além de exibirem mesofases intermediárias entre os estados sólido e líquido, o que os torna particularmente relevantes tanto do ponto de vista da Física básica quanto de suas aplicações tecnológicas. Os cristais líquidos estão presentes em uma ampla gama de dispositivos, especialmente nos displays de cristal líquido (LCD), constituindo um exemplo acessível e familiar aos estudantes.

Do ponto de vista conceitual, o estudo dos cristais líquidos permite articular conteúdos tradicionalmente abordados no ensino médio, como estados físicos da matéria, polarização da luz e campos elétricos, com fenômenos menos explorados nesse nível de ensino, como anisotropia óptica, transições de fase e propriedades emergentes da matéria. Essa articulação pode ser visualizada de forma esquemática na Figura 1. Conforme discutem Neto e Salinas (2005) e Sengupta (2013), os cristais líquidos ocupam uma posição intermediária entre sólidos cristalinos e líquidos isotrópicos, apresentando comportamento altamente sensível a variações de temperatura e à aplicação de campos elétricos, características fundamentais para o funcionamento dos displays de cristal líquido.

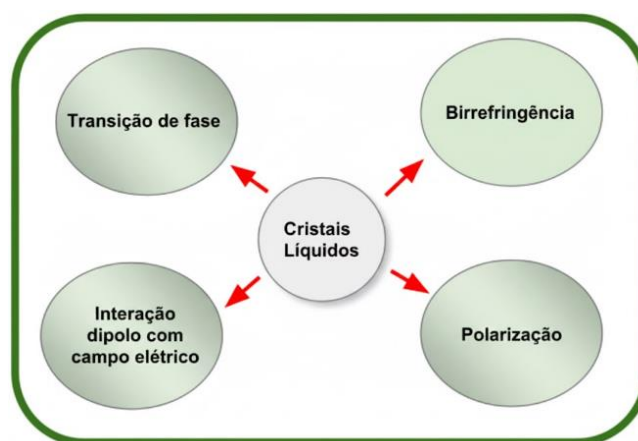


Figura 1. Relação entre os cristais líquidos e diversas áreas da física.

Fonte: Autoria própria

Nesse contexto, o presente trabalho deriva de uma dissertação de mestrado desenvolvida no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) e teve parte de seus resultados apresentados no Encontro Nacional do MNPEF, inserindo-se no contexto de formação

continuada de professores e de reflexão sobre práticas experimentais no ensino médio.

Entretanto, a inserção de temas dessa natureza no ensino médio exige estratégias pedagógicas que considerem tanto as limitações de infraestrutura das escolas quanto as dificuldades conceituais associadas à Física contemporânea. Nesse sentido, a teoria da aprendizagem significativa proposta por Ausubel, conforme sistematizada por Moreira (2006), oferece um referencial importante ao enfatizar que novos conhecimentos tornam-se significativos quando podem ser ancorados em subsunçores já presentes na estrutura cognitiva do aprendiz. A utilização de exemplos do cotidiano e de atividades experimentais contextualizadas pode, portanto, favorecer essa ancoragem conceitual.

Associada a esse referencial, a metodologia da sala de aula invertida apresenta-se como uma estratégia adequada para contornar restrições de tempo frequentemente enfrentadas no ensino de Física. Segundo Bergmann e Sams (2016), essa abordagem permite que os estudantes tenham contato prévio com os conteúdos teóricos por meio de recursos digitais, reservando os momentos presenciais para atividades investigativas, discussões orientadas e experimentação. Tal organização favorece o protagonismo estudantil e a integração entre teoria e prática, especialmente quando associada a atividades experimentais de caráter exploratório.

Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma proposta didática que integra o uso de uma plataforma digital educacional com a realização de uma atividade experimental baseada na construção e experimentação de um display de cristal líquido termotrópico. A proposta foi aplicada em formato de oficina com estudantes do 2º ano do ensino médio e buscou aproximá-los de conceitos da Física contemporânea relacionados à nanotecnologia, articulando fundamentos teóricos e experimentação didática.

2. Referencial Teórico

2.1. Aprendizagem significativa no ensino de Física

A proposta desenvolvida neste trabalho fundamenta-se na teoria da aprendizagem significativa, formulada por Ausubel e sistematizada por Moreira (2006), segundo a qual a aprendizagem ocorre de maneira mais efetiva quando novos conhecimentos podem ser ancorados em conceitos já presentes na estrutura cognitiva do estudante. Em contraste com a aprendizagem mecânica, a aprendizagem significativa envolve a construção de relações substantivas e não arbitrárias entre os novos conteúdos e os conhecimentos prévios do aluno.

No contexto do ensino de Física, esse referencial teórico destaca a importância de estratégias pedagógicas que favoreçam a atribuição de sentido aos conceitos estudados. Atividades experimentais que possibilitam a observação direta de fenômenos físicos, especialmente quando articuladas a aplicações tecnológicas familiares aos estudantes, configuram-se como elementos centrais para a promoção desse tipo de aprendizagem.

2.2. Cristais líquidos e fundamentos físicos dos displays LCD

Do ponto de vista conceitual, este trabalho apoia-se nos fundamentos físicos dos cristais líquidos, com ênfase nos cristais líquidos termotrópicos empregados em displays de cristal líquido (LCD). Conforme descrito por Bechtold (2005), os cristais líquidos constituem um estado intermediário da matéria, apresentando propriedades características tanto de sólidos cristalinos quanto de líquidos isotrópicos. Esses materiais exibem anisotropia óptica e dielétrica e organizam-se em diferentes mesofases, cuja estrutura molecular pode ser modificada por variações de temperatura e pela aplicação de campos elétricos.

A organização molecular dos cristais líquidos é fortemente influenciada pela interação com as

superfícies que os confinam, fenômeno conhecido como ancoragem. Dependendo do tratamento adotado, as moléculas podem apresentar diferentes orientações preferenciais em relação à superfície, como as configurações planar, homeotrópica e inclinada, ilustradas na Figura 2.

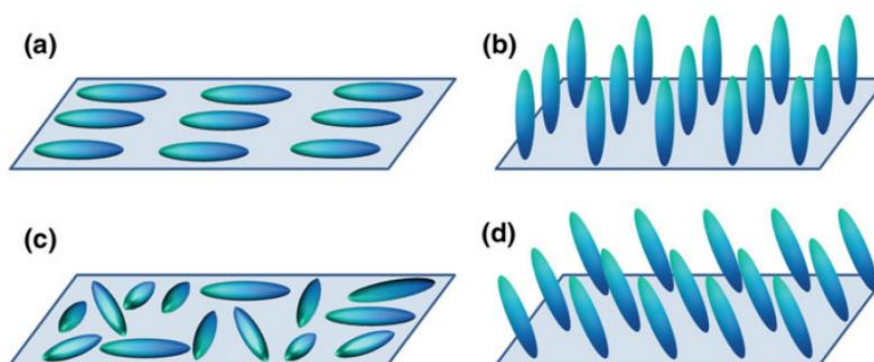


Figura 2. Ancoragem de cristal líquido nemático em uma superfície: **a** ancoragem planar uniforme **b** ancoragem homeotrópica **c** ancoragem planar degenerada **d** ancoragem inclinada.

Fonte: Sengupta (2013)

Conforme discutido por Sengupta (2013), a resposta dos cristais líquidos a estímulos externos manifesta-se, do ponto de vista físico, por meio de diferentes modos de deformação elástica do campo diretor, conhecidos como splay, twist e bend. Essas deformações estão diretamente associadas às propriedades elásticas do material e desempenham papel fundamental na sua resposta óptica e eletromecânica, conforme ilustrado na Figura 3.

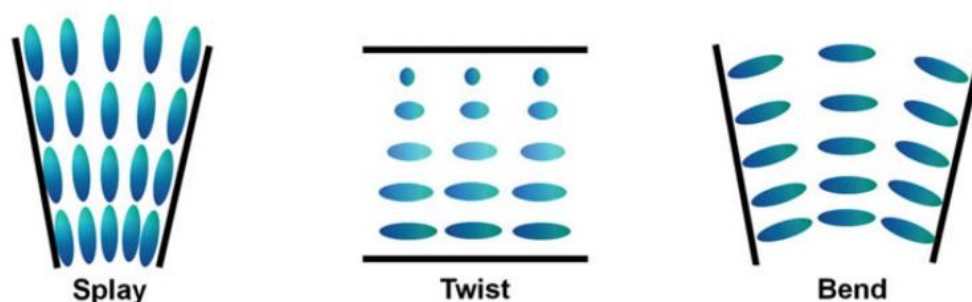


Figura 3. Deformações Elásticas em Cristais Líquidos Nemáticos: Splay, Twist e Bend

Fonte: Sengupta (2013)

Neto e Salinas (2005) destacam que a organização molecular orientacional dos cristais líquidos permite a manipulação do estado de polarização da luz quando o material é inserido entre filtros polarizadores. Esse comportamento é a base física do funcionamento dos dispositivos LCD, nos quais a aplicação de um campo elétrico modifica a orientação molecular do cristal líquido, controlando a transmissão da luz e possibilitando a formação de imagens, conforme esquematizado na Figura 4.

Nesse contexto, a utilização de cristais líquidos termotrópicos em atividades experimentais no ensino médio permite articular conceitos como estados físicos da matéria, polarização da luz, anisotropia óptica e transições de fase, estabelecendo uma ponte entre fundamentos da Física e aplicações tecnológicas contemporâneas. A construção e a experimentação de uma célula de cristal líquido configuram-se como uma estratégia adequada para articular fundamentos físicos e aplicações tecnológicas contemporâneas no ensino de Física.

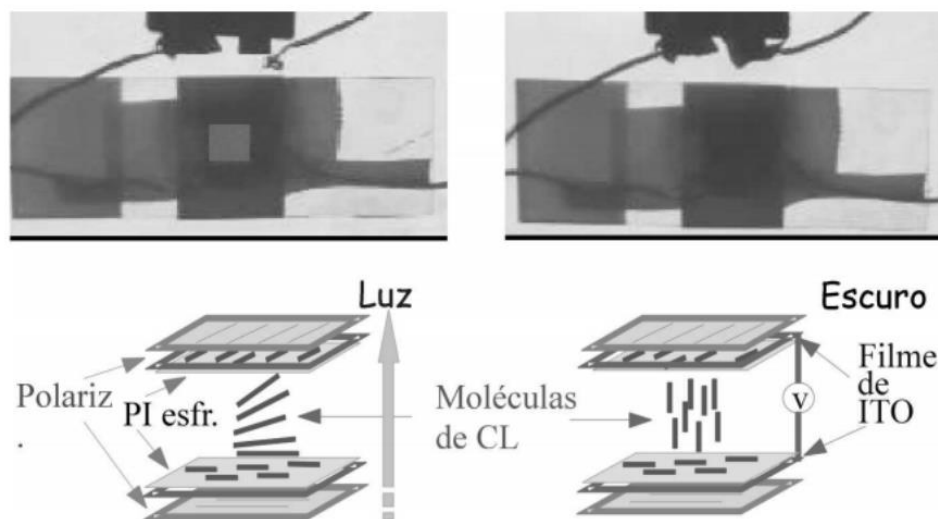


Figura 4. Funcionamento do display de LCD
Fonte: Bechtold (2005)

3. Metodologia

O presente trabalho caracteriza-se como um relato de experiência didático-experimental, alinhado às práticas consolidadas da pesquisa em ensino de Física. A atividade foi desenvolvida com estudantes do 2º ano do ensino médio, tendo como eixo central a construção e a experimentação de uma célula de cristal líquido termotrópico. A proposta foi estruturada de modo a possibilitar a exploração de conceitos da Física contemporânea por meio da observação direta de fenômenos associados ao funcionamento de displays de cristal líquido (LCD).

3.1. Planejamento da atividade experimental

Na etapa de planejamento, foram estudadas as propriedades físicas dos cristais líquidos termotrópicos, com ênfase no cristal líquido 4-ciano-4'-pentilbifenil (5CB), amplamente utilizado em aplicações didáticas e tecnológicas. A partir desse estudo, foi definida a configuração da célula experimental a ser construída pelos estudantes, considerando critérios de viabilidade, segurança e adequação ao contexto escolar.

A célula de cristal líquido foi projetada a partir de lâminas de vidro revestidas com óxido de índio-estanho (ITO), utilizadas como eletrodos transparentes. Para promover o alinhamento das moléculas do cristal líquido, as superfícies condutoras foram tratadas com uma fina camada de poli(álcool vinílico) (PVA), submetida posteriormente à técnica de *rubbing*, que consiste no atrito controlado da superfície para induzir orientação molecular preferencial. Espaçadores foram utilizados para garantir a separação uniforme entre as lâminas de vidro, permitindo a formação da camada de cristal líquido.

Filtros polarizadores foram incorporados ao sistema experimental, possibilitando a visualização das propriedades ópticas anisotrópicas do material. Essa configuração permitiu aos estudantes observar alterações na transmissão da luz associadas à variação de temperatura e à aplicação de um campo elétrico externo, fenômenos diretamente relacionados ao funcionamento dos dispositivos LCD. A seguir, apresentam-se os materiais empregados, os procedimentos experimentais adotados e a forma de execução da atividade com os estudantes.

3.2. Materiais Utilizados

Duas lâminas de vidro com recobrimento de ITO - Indium Tin Oxide. A camada fina de ITO apresenta transparência óptica e condutividade elétrica, possibilitando a aplicação de uma diferença de potencial entre as placas. A região ativa considerada adequada para a realização do experimento apresentou dimensões da ordem de $1,0\text{ cm} \times 1,0\text{ cm}$, razão pela qual as lâminas utilizadas possuíam dimensões superiores a esse valor. A construção de celas com diferentes dimensões mostrou-se possível, sendo que dimensões menores implicam menor consumo de cristal líquido. Foi utilizado álcool polivinílico (PVA) para a deposição de um filme polimérico sobre as lâminas de vidro: O PVA foi dissolvido em água, em concentração de 2% em massa. Para a obtenção de um filme homogêneo, com espessura da ordem de 200 nm, a deposição foi realizada por meio da técnica de spin-coating, a 3.000 rpm durante 30 s, seguida de aquecimento em estufa por aproximadamente 1 h a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, para evaporação do solvente.

A técnica de spin-coating permite a obtenção de camadas poliméricas ultrafinas, da ordem de centenas de nanômetros, em função do espalhamento radial da solução promovido pela rotação do substrato. Como alternativa à técnica de spin-coating, a solução de PVA pode ser espalhada manualmente sobre a superfície da lâmina, sendo posteriormente submetida à evaporação do solvente à temperatura ambiente. Nessa condição, o filme apresenta menor uniformidade e espessura da ordem de alguns micrômetros; contudo, do ponto de vista macroscópico, o funcionamento do dispositivo não é comprometido.

Para a realização do processo de esfregamento do polímero, foi utilizado um pedaço de veludo. Esse processo consistiu no deslizamento do veludo, que pode ser envolvido em um suporte cilíndrico, levemente pressionado sobre o filme polimérico, em uma direção definida. Foram realizadas entre três e cinco passadas sobre o filme. Esse procedimento induziu uma direção preferencial de alinhamento molecular do cristal líquido, coincidente com a direção de esfregamento. O material utilizado apresenta fácil obtenção no contexto escolar. A Figura 5 apresenta o álcool polivinílico e o veludo utilizados na realização do experimento.



Figura 5. Álcool polivinílico e Veludo
Fonte: Autoria Própria

Foram utilizados espaçadores de mylar ou papel celofane, com espessura entre 10 e 20 μm , para definir a separação entre as lâminas de vidro onde o cristal líquido foi inserido. A célula foi preparada por meio da sobreposição das lâminas, com os tratamentos de superfície voltados para o lado interno e com as direções de esfregamento cruzadas entre si em 90 graus. Duas tiras do espaçador foram posicionadas em duas das laterais do conjunto. Durante o processo de deposição do cristal líquido, as lâminas foram mantidas unidas com o auxílio de prendedores.

Para a aplicação do campo elétrico, foi utilizada uma fonte de tensão de 9 V. Dois fios condutores foram empregados, com uma das extremidades de cada fio conectada ao recobrimento de

ITO presente em cada uma das lâminas de vidro. Como material ativo, foi utilizado um cristal líquido termotrópico do tipo 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl, conhecido comercialmente como 5CB ou K15. A Figura 6 apresenta um esquema representativo da montagem da célula.

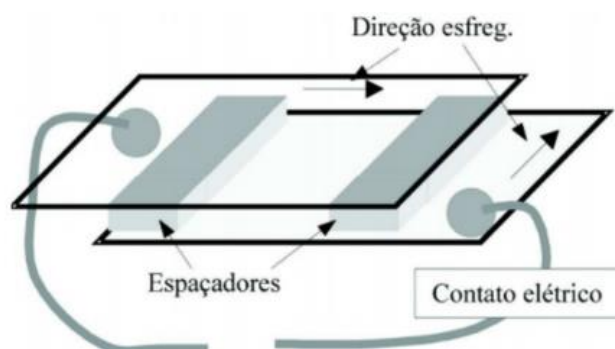


Figura 6. Montagem da Célula

Fonte: Autoria Própria

Foram utilizados dois filtros polarizadores com dimensões equivalentes às das lâminas de vidro. Os filtros utilizados correspondem a polarizadores lineares de baixo custo e fácil obtenção. Os polarizadores foram fixados sobre a célula de cristal líquido. Os polarizadores empregados são comercialmente destinados à aplicação em telas de smartphones. A Figura 7 apresenta o cristal líquido utilizado e os filtros polarizadores empregados no experimento.



Figura 7. Polarizadores e cristal líquido utilizados

Fonte: Autoria Própria

3.3. Procedimentos experimentais

O procedimento experimental para a construção da célula de cristal líquido termotrópico baseou-se no roteiro proposto por Bechtold (2005), originalmente apresentado com finalidade didática, voltado à discussão de fenômenos de óptica, como polarização e birrefringência, no contexto da física dos cristais líquidos.

O procedimento teve início com a etapa de limpeza das lâminas de vidro revestidas com óxido de índio-estanho (ITO), considerada fundamental para garantir a qualidade da deposição dos filmes poliméricos e o adequado alinhamento molecular do cristal líquido. Inicialmente, as lâminas foram lavadas com água corrente e detergente neutro, com o objetivo de remover impurezas superficiais. Em seguida, realizou-se uma limpeza mais criteriosa por meio de um banho de ultrassom em álcool etílico, no qual as lâminas permaneceram imersas por aproximadamente 30 minutos.

Após essa etapa, o procedimento foi repetido utilizando água destilada, também por um período de 30 minutos, visando à eliminação de resíduos remanescentes do solvente anterior. A Figura 8 ilustra o processo de limpeza das lâminas de vidro revestidas com ITO durante o banho de ultrassom.



Figura 8. Banho de ultrassom
Fonte: Autoria Própria

Embora o uso do banho de ultrassom favoreça uma limpeza mais eficiente, testes realizados sem essa etapa indicaram que o funcionamento do dispositivo não é comprometido do ponto de vista macroscópico. Essa constatação reforça a viabilidade da proposta em contextos escolares com infraestrutura limitada, aspecto discutido com os estudantes durante a atividade.

Após a limpeza, procedeu-se à identificação da face condutora das lâminas de vidro revestidas com ITO, etapa necessária para assegurar a correta deposição dos filmes de alinhamento e a posterior aplicação do campo elétrico. Essa identificação foi realizada por meio de medições de resistência elétrica com o auxílio de um multímetro, permitindo distinguir a superfície recoberta com ITO daquela constituída apenas de vidro. A correta identificação da face condutora garantiu que os tratamentos subsequentes fossem aplicados de maneira adequada, evitando comprometimentos no funcionamento da célula experimental.

Em seguida, realizou-se a deposição de um filme fino de álcool polivinílico (PVA), utilizado como camada de alinhamento molecular do cristal líquido. A deposição foi efetuada, preferencialmente, por meio da técnica de spin-coating, posicionando-se a lâmina com a face condutora voltada para cima e aplicando-se uma pequena quantidade da solução de PVA em sua região central, conforme apresentado na Figura 9. O espalhamento uniforme do polímero foi obtido com a rotação da lâmina a 3000 rpm por aproximadamente 30 segundos, procedimento repetido para a segunda lâmina. Após a deposição, as lâminas foram submetidas a um processo de secagem em estufa a cerca de 80 °C por aproximadamente uma hora, assegurando a completa evaporação do solvente e a formação de um filme homogêneo.

Em situações nas quais a técnica de spin-coating e a estufa não se encontravam disponíveis, a deposição do filme polimérico foi realizada por espalhamento manual da solução de PVA sobre a superfície da lâmina, seguida da evaporação do solvente à temperatura ambiente por cerca de 24 horas. Embora essa alternativa resulte em filmes de maior espessura e menor uniformidade, verificou-se que o funcionamento do dispositivo não é comprometido do ponto de vista macroscópico, o que amplia a aplicabilidade da proposta em ambientes escolares diversos. Essa flexibilidade também permitiu que a preparação das lâminas e a montagem das células fossem realizadas em momentos distintos, facilitando a organização da atividade didática. Após a formação do filme polimérico, procedeu-se ao tratamento superficial por meio da técnica de *rubbing*, que consiste no esfregamento controlado da superfície do PVA utilizando um tecido de veludo envolvido em um suporte cilíndrico. Esse procedimento foi realizado em direções ortogonais nas duas lâminas, induzindo direções preferenciais distintas de alinhamento molecular. O esfregamento foi realizado sempre no mesmo sentido em cada lâmina, garantindo a uniformidade do alinhamento induzido, condição essencial para o funcionamento óptico da célula de cristal líquido.

A montagem da célula experimental foi realizada por meio da sobreposição das duas lâminas tratadas, mantendo-se as superfícies recobertas com PVA voltadas uma para a outra, formando uma estrutura análoga a um sanduíche. Espaçadores foram posicionados entre as lâminas para garantir uma separação uniforme e controlada, definindo a espessura da camada de cristal líquido a ser inserida. Durante essa etapa, manteve-se uma pequena área livre nas extremidades das lâminas, permitindo a realização dos contatos elétricos necessários à aplicação do campo elétrico no dispositivo. Para assegurar a estabilidade mecânica do conjunto e facilitar o manuseio durante a deposição do cristal líquido, as lâminas foram temporariamente fixadas com prendedores. A Figura 9 apresenta os espaçadores posicionados entre as lâminas e ilustra as etapas associadas à preparação da célula..



Figura 9. Deposição do filme de PVA e posicionamento dos espaçadores na preparação da célula.

Fonte: Autoria Própria

O preenchimento da célula com o cristal líquido ocorreu por capilaridade, sendo suficiente, para fins didáticos, a utilização de uma célula de pequenas dimensões, uma vez que mesmo regiões reduzidas permitem a observação clara do fenômeno óptico associado à orientação molecular do material. Caso se desejasse o preenchimento completo da célula, adicionou-se gradualmente mais cristal líquido até que cessasse o movimento capilar observado durante a infiltração.

Após o preenchimento, filtros polarizadores foram fixados em cada uma das faces externas da célula, recortados de modo a acompanhar suas dimensões. Os filtros foram posicionados de forma cruzada, com seus eixos de polarização orientados a 90° entre si, condição essencial para a observação da modulação da luz promovida pelo cristal líquido. Na ausência do material ativo, a região da célula apresenta-se escura devido ao bloqueio da luz pelos polarizadores cruzados; entretanto, nas regiões preenchidas pelo cristal líquido, observa-se a modificação do estado de polarização da luz, evidenciando o funcionamento do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 10.

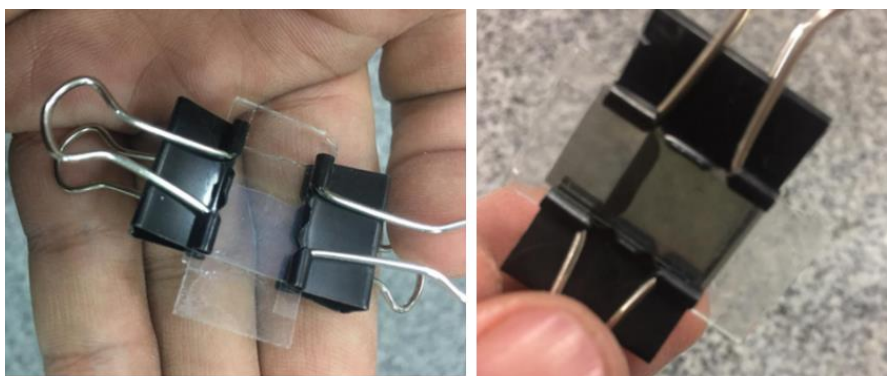


Figura 10. Lâmina montada com e sem os filtros polarizadores

Fonte: Autoria própria

A região escura corresponde, portanto, às áreas da célula onde o cristal líquido não penetrou. Nessa etapa, o display de cristal líquido já se encontra funcional, permitindo a realização dos

primeiros testes e observações do comportamento óptico do dispositivo. A Figura 11 apresenta a diferença no comportamento óptico da célula de cristal líquido na ausência e na presença da aplicação de tensão elétrica. Quando a tensão é aplicada, ocorre a reorientação das moléculas do cristal líquido, o que impede a rotação do plano de polarização da luz em 90° . Como consequência, a luz é bloqueada pelos polarizadores cruzados, fazendo com que a célula apresente aspecto escuro.



Figura 11. Tensão sendo aplicada na lâmina (da esquerda)
Fonte: Autoria própria

3.4. Execução da atividade com os estudantes

A atividade experimental foi desenvolvida no formato de oficina didático-investigativa, na qual os estudantes participaram das etapas de construção, montagem e análise da célula de cristal líquido. Os alunos trabalharam em grupos de cinco integrantes e, ao todo, foram construídas quatro células de LCD com dimensões variadas. Sob a orientação do professor, os estudantes manusearam os materiais, acompanharam o processo de inserção do cristal líquido entre as lâminas de vidro e participaram das decisões associadas às diferentes etapas do experimento, observando o funcionamento do dispositivo ao longo do processo.

Durante a experimentação, os estudantes realizaram observações sistemáticas do comportamento óptico da célula quando posicionada entre filtros polarizadores cruzados, bem como analisaram as modificações visuais decorrentes da aplicação de um campo elétrico externo. Como a atividade integrou o processo de avaliação regular da disciplina, os alunos preencheram um questionário contendo questões conceituais relacionadas aos fundamentos físicos do experimento enquanto o realizavam. A atividade foi desenvolvida ao longo de duas semanas, em aulas com duração de 100 minutos cada. Na primeira semana, realizou-se a preparação das lâminas; na segunda, procedeu-se à inserção do cristal líquido e à realização dos testes experimentais.

No intervalo entre as aulas presenciais, os estudantes foram orientados a acessar uma plataforma digital criada especificamente para essa atividade, na qual estavam disponíveis textos de apoio, vídeos explicativos e questões orientadoras. Essa organização caracterizou a adoção da metodologia da sala de aula invertida, permitindo que os alunos tivessem contato prévio com os conteúdos teóricos e chegassem à aula experimental com maior familiaridade conceitual. A comparação entre as condições com e sem aplicação de tensão serviu de base para discussões orientadas sobre conceitos como anisotropia óptica, organização molecular, mesofases e transições de fase, os quais foram relacionados ao funcionamento de telas de cristal líquido presentes em dispositivos do cotidiano, como smartphones, monitores e televisores.

Ao longo da oficina, o professor atuou como mediador das discussões, conduzindo

questionamentos e incentivando a formulação de hipóteses e a interpretação dos fenômenos observados, com ênfase na relação entre a organização microscópica das moléculas e os efeitos macroscópicos observados no dispositivo. Essa condução conferiu à atividade um caráter investigativo, em consonância com os pressupostos da aprendizagem significativa adotados neste trabalho.

Como suporte à organização da atividade, foram disponibilizados previamente aos estudantes materiais digitais por meio de uma plataforma online, conforme ilustrado na Figura 12. A plataforma utilizada foi o Google Sites. Os materiais disponibilizados incluíram orientações gerais, vídeos explicativos e textos de apoio, com o objetivo de preparar os alunos para a atividade experimental e otimizar o tempo destinado às atividades presenciais. Ressalta-se que tais recursos atuaram como instrumentos de apoio pedagógico, sem substituir a experimentação realizada em sala.

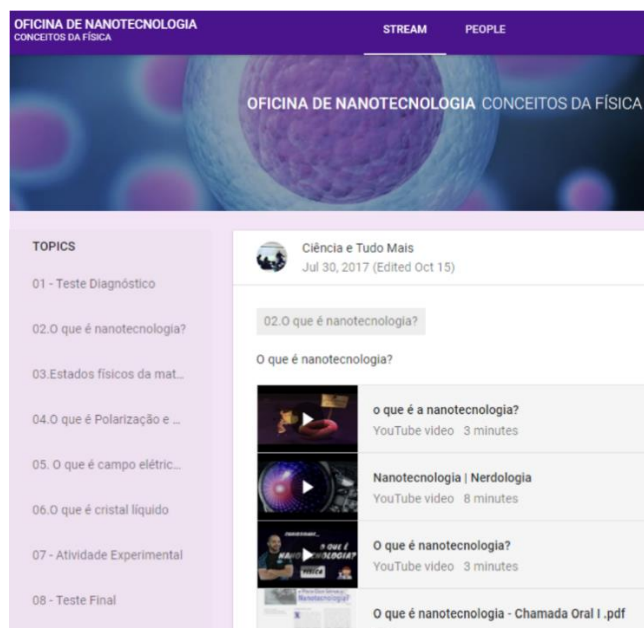


Figura 12. Plataforma Online Criada
Fonte: Autoria própria

4. Resultados e Discussões

A aplicação da atividade didático-experimental evidenciou resultados positivos tanto no que se refere ao funcionamento físico do dispositivo construído quanto ao engajamento dos estudantes e à compreensão de conceitos associados aos cristais líquidos e ao funcionamento de displays de cristal líquido (LCD). A participação ativa dos alunos em todas as etapas da construção da célula experimental favoreceu a observação direta de fenômenos físicos, possibilitando a articulação entre conceitos tradicionalmente abordados de forma abstrata no ensino médio e aplicações tecnológicas presentes no cotidiano.

Embora o cristal líquido termotrópico utilizado seja um insumo de laboratório, a quantidade necessária para a construção de cada célula é da ordem de microlitros. Dessa forma, uma única aquisição do material mostrou-se suficiente para a realização da atividade com diversas turmas ao longo do tempo. No contexto da aplicação descrita neste trabalho, os estudantes foram organizados em grupos de quatro a cinco integrantes, estratégia que permitiu otimizar o uso do material, reduzir custos e, simultaneamente, favorecer o trabalho colaborativo durante a atividade experimental.

Do ponto de vista experimental, observou-se que a aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos da célula promoveu a transição do dispositivo de um estado claro para um estado escuro, caracterizando o funcionamento adequado da célula de cristal líquido construída. Esse

comportamento confirma que o dispositivo desenvolvido apresenta as características fundamentais de um display de cristal líquido funcional, ainda que em escala reduzida. Nesse sentido, a célula construída pode ser interpretada como a representação de um único pixel, enquanto dispositivos comerciais são constituídos por matrizes formadas por milhares ou milhões dessas unidades, associadas a filtros de cores vermelho, verde e azul, responsáveis pela formação das imagens observadas em telas de computadores, televisores e smartphones. Apesar da maior complexidade dos sistemas comerciais, o princípio físico de funcionamento é essencialmente o mesmo.

O comportamento óptico observado está diretamente relacionado ao alinhamento molecular induzido durante a montagem da célula. O tratamento superficial das lâminas por meio da técnica de rubbing promoveu a formação de ranhuras microscópicas no filme polimérico de PVA depositado sobre as superfícies internas do dispositivo. Essas ranhuras, orientadas de forma perpendicular entre as duas lâminas, induziram direções preferenciais distintas de alinhamento molecular, resultando na organização gradual das moléculas do cristal líquido ao longo da espessura da célula. Essa organização dá origem a uma estrutura helicoidal, responsável pela rotação do plano de polarização da luz incidente.

Na ausência de campo elétrico, a luz polarizada que atravessa a célula sofre uma rotação de aproximadamente 90° devido à estrutura helicoidal formada pelas moléculas do cristal líquido, permitindo sua transmissão através dos polarizadores cruzados. Por outro lado, quando uma diferença de potencial é aplicada, as moléculas do cristal líquido, por apresentarem caráter dipolar, alinham-se paralelamente ao campo elétrico. Nessa condição, a estrutura helicoidal é suprimida, impedindo a rotação do plano de polarização da luz, o que resulta no bloqueio da luz pelos polarizadores cruzados e no escurecimento da célula.

Durante a oficina, os estudantes demonstraram interesse acentuado ao acompanhar as diferentes etapas da montagem da célula de cristal líquido, especialmente no momento em que o dispositivo passou a apresentar variações visuais quando posicionado entre filtros polarizadores e submetido à aplicação de um campo elétrico. A possibilidade de observar, de forma concreta, alterações na transmissão da luz favoreceu a associação entre conceitos como anisotropia óptica e organização molecular e os princípios de funcionamento das telas de LCD amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos do cotidiano.

As observações realizadas ao longo da atividade indicaram que a experimentação contribuiu para a compreensão de conceitos tradicionalmente considerados abstratos no ensino médio, como mesofases e transições de fase. Ao observar a resposta do cristal líquido tanto à variação de temperatura quanto à aplicação de um campo elétrico, os estudantes puderam identificar diferenças no comportamento do material em relação aos estados sólido e líquido, reconhecendo a existência de um estado intermediário da matéria, conforme descrito na literatura especializada.

A análise dos questionários aplicados após a atividade experimental, bem como dos relatos breves solicitados aos estudantes, revelou uma percepção amplamente positiva quanto à clareza dos conceitos abordados e à relevância da atividade para a compreensão do conteúdo. Diversos alunos destacaram a facilidade em estabelecer relações entre os fenômenos observados no experimento e o funcionamento de telas de celulares, monitores e outros dispositivos eletrônicos, reforçando o potencial da atividade como estratégia de contextualização da Física contemporânea.

Do ponto de vista pedagógico, os resultados sugerem que a construção e a experimentação de uma célula de cristal líquido favorecem o engajamento dos estudantes e a atribuição de sentido aos conceitos trabalhados, ao permitir que assumam um papel ativo no processo de construção do conhecimento. A observação direta dos fenômenos físicos, aliada à mediação do professor, contribuiu para o estabelecimento de relações significativas entre os conceitos físicos explorados e as aplicações tecnológicas discutidas, em consonância com os pressupostos da aprendizagem significativa. Além disso, o uso de recursos digitais como apoio à organização da atividade mostrou-se adequado para

preparar os estudantes para a experimentação, sem comprometer o caráter central da atividade prática, favorecendo discussões mais aprofundadas durante a oficina.

De modo geral, os resultados indicam que a atividade experimental proposta é viável em contextos escolares com recursos limitados e apresenta elevado potencial para a introdução de temas de nanotecnologia no ensino médio, contribuindo para ampliar o interesse dos estudantes pela Física contemporânea e promover uma compreensão mais integrada dos fenômenos físicos associados aos cristais líquidos e aos dispositivos tecnológicos baseados nessa tecnologia.

5. Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma proposta didático-experimental voltada à introdução de conceitos de nanotecnologia no ensino médio, por meio da construção e experimentação de uma célula de cristal líquido termotrópico. A atividade permitiu articular fundamentos da Física contemporânea, como anisotropia óptica, organização molecular e transições de fase, com aplicações tecnológicas presentes no cotidiano dos estudantes, em especial os displays de cristal líquido (LCD). As observações evidenciam que a construção do dispositivo, mesmo em escala reduzida, possibilitou a observação direta de fenômenos físicos relevantes e favoreceu o engajamento dos estudantes ao longo da atividade. A utilização de pequenas quantidades de cristal líquido, da ordem de microlitros, mostrou-se suficiente para a realização da proposta com diferentes turmas, evidenciando sua viabilidade prática e econômica, inclusive em contextos escolares com recursos limitados.

Do ponto de vista pedagógico, a atividade contribuiu para a atribuição de sentido a conceitos tradicionalmente considerados abstratos no ensino médio, ao permitir que os estudantes acompanhassem e interpretassem a relação entre a organização microscópica das moléculas do cristal líquido e os efeitos macroscópicos observados no dispositivo. A mediação do professor e a participação ativa dos alunos favoreceram uma abordagem investigativa, em consonância com os pressupostos da aprendizagem significativa. A integração de recursos digitais como apoio à organização da atividade, no contexto da metodologia da sala de aula invertida, mostrou-se adequada para preparar os estudantes para a experimentação, sem substituir o caráter central da atividade prática. Essa combinação contribuiu para otimizar o tempo de aula presencial e ampliar as possibilidades de discussão durante a oficina.

De modo geral, a proposta apresentada demonstra que é possível inserir temas de nanotecnologia no ensino médio de forma acessível, experimental e conceitualmente consistente. A atividade configura-se como uma estratégia didática potencialmente replicável e adaptável a diferentes realidades escolares, contribuindo para aproximar a Física escolar das tecnologias contemporâneas e ampliar o interesse dos estudantes pela Física moderna e contemporânea.

Referências

- Bechtold, I. (2005). Cristais líquidos: um sistema complexo de simples aplicação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(3), 333–342.
- Bergmann, J., & Sams, A. (2016). *Sala de aula invertida: uma metodologia ativa de aprendizagem* (Tradução de Afonso Celso da Cunha Serra). Rio de Janeiro: LTC.
- Moreira, M. A. (2006). *Aprendizagem significativa: da visão clássica à visão crítica*. Conferência de encerramento do V Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Madrid, Espanha.

Neto, A. M. F., & Salinas, S. R. A. (2005). *The physics of lyotropic liquid crystals: Phase transitions and structural properties*. Oxford: Oxford University Press.

Sengupta, A. (2013). *Topological microfluidics: Nematic liquid crystals and nematic colloids in microfluidic environment*. Switzerland: Springer International Publishing.