

EXPLORANDO ÍNDICES DE MILLER E PLANOS CRISTALOGRAFICOS EM SÓLIDOS CRISTALINOS POR MEIO DE MAQUETES: UMA ABORDAGEM INTERDISCIPLINAR PARA O ENSINO MÉDIO

Exploring Miller Indices and Crystallographic Planes in Crystalline Solids through Physical Models: An Interdisciplinary Approach for High School Education

Ellen Karina Castro da Costa [ellencastroap30@gmail.com]

Jackeline del Rosario C. García [jackeline.collave@unifap.br]

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

Rodovia Josmar Chaves Pinto, Km 2- Jardim Marco Zero- Macapá- AP, 68903-419

Resumo

Este trabalho apresenta e analisa uma sequência didática interdisciplinar voltada ao ensino de estruturas cristalinas, planos cristalográficos e índices de Miller como vetores, compreendidos tanto como descritores de planos quanto como representações vetoriais de direções cristalográficas. A proposta fundamenta-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e foi desenvolvida com o uso de maquetes tridimensionais. A pesquisa, de natureza qualitativa e quantitativa, foi aplicada a estudantes da 1ª série do Ensino Médio de uma escola pública, ao longo de cinco aulas sequenciais, envolvendo atividades diagnósticas, práticas, colaborativas e avaliativas. Os instrumentos de coleta de dados incluíram questionários prévio e final, atividades discursivas em grupo e observações em sala de aula. Os resultados evidenciam avanços conceituais significativos, indicando que os estudantes passaram de concepções iniciais baseadas no senso comum para explicações que articulam a organização interna dos sólidos cristalinos, a orientação de planos e direções cristalográficas, bem como a interpretação dos índices de Miller como vetores associados à geometria do cristal, e suas aplicações na Ciência dos Materiais, como a difração de raios X. A análise das respostas discursivas revelou que as maquetes atuaram como mediadoras cognitivas, favorecendo a manipulação das estruturas, a compreensão, da geometria espacial, a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora de conceitos dos alunos. Conclui-se que a utilização de maquetes tridimensionais constitui uma estratégia didática eficaz para o ensino de cristalografia no Ensino Médio, ampliando as possibilidades pedagógicas para a abordagem de conteúdos avançados de forma significativa, contextualizada e acessível.

Palavras-chave: Índices de Miller; Aprendizagem significativa; Maquetes; Ensino médio.

Abstract

This study presents and analyzes an interdisciplinary didactic sequence designed for teaching crystalline structures, crystallographic planes, and Miller indices as vectors—interpreted both as plane descriptors and vector representations of crystallographic directions. The proposal is grounded in David Ausubel's Theory of Meaningful Learning and was developed using three-dimensional physical models. The research, which adopts a qualitative and quantitative approach, was conducted with first-year high school students from a public school over five sequential lessons, incorporating

diagnostic, practical, collaborative, and evaluative activities. Data were collected through pre- and post-questionnaires, group discursive tasks, and classroom observations. The results reveal significant conceptual progress, indicating that students moved from initial commonsense conceptions toward explanations that integrate the internal organization of crystalline solids, the orientation of crystallographic planes and directions, and the interpretation of Miller indices as vectors linked to crystal geometry, along with their applications in Materials Science, such as X-ray diffraction. Analysis of discursive responses showed that the physical models served as cognitive mediators, fostering hands-on manipulation of structures, spatial geometry comprehension, progressive differentiation, and integrative reconciliation of concepts among students. It is concluded that the use of three-dimensional models constitutes an effective didactic strategy for teaching crystallography in high school, expanding pedagogical possibilities for addressing advanced content in a meaningful, contextualized, and accessible way.

Keywords: Miller indices; Meaningful learning; Physical models; High school education.

1. Introdução

Os materiais estão profundamente inseridos na vida cotidiana e exercem influência direta em praticamente todas as atividades humanas, desde a construção civil e os meios de transporte até as tecnologias de comunicação e produção de energia. O desenvolvimento das sociedades sempre esteve associado à capacidade de compreender, produzir e manipular materiais com propriedades específicas, o que torna a Ciência dos Materiais um campo estratégico para o avanço científico e tecnológico (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018).

A Ciência dos Materiais caracteriza-se por seu caráter interdisciplinar, integrando conhecimentos de Física, Química, Matemática e Engenharia para compreender a relação entre a estrutura interna dos materiais e suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e elétricas. Nesse contexto, a cristalografia ocupa papel central, pois permite descrever a organização atômica dos sólidos e explicar como essa organização influencia o comportamento dos materiais em diferentes aplicações (SHACKELFORD, 2015).

Para descrever essa organização espacial, a cristalografia utiliza sistemas de notação específicos, entre os quais se destacam os índices de Miller, desenvolvidos no século XIX por William Hallowes Miller. Essa notação permite representar, de forma padronizada, a orientação de planos cristalográficos e direções em uma rede cristalina, sendo amplamente utilizada na caracterização estrutural dos materiais e na interpretação de fenômenos como a difração de raios X (PUREUR, 2016).

Os índices de Miller desempenham papel fundamental na Física do Estado Sólido e na Ciência dos Materiais, pois estabelecem uma relação direta entre a geometria da célula unitária e fenômenos físicos observáveis experimentalmente. A identificação de planos cristalográficos por meio dessa notação possibilita compreender processos como deformação mecânica, clivagem dos cristais e padrões de difração, essenciais para a análise estrutural dos sólidos (SHACKELFORD, 2015).

Apesar de sua relevância científica e tecnológica, os conceitos de cristalografia e índices de Miller raramente são abordados no Ensino Médio. Quando aparecem, costumam ser tratados de forma superficial, o que dificulta a compreensão por parte dos estudantes, sobretudo devido ao caráter abstrato, matemático e tridimensional desses conteúdos (GUARIZE et al., 2020).

A dificuldade dos estudantes em compreender conceitos tridimensionais por meio de representações bidimensionais, como figuras em livros didáticos ou explicações exclusivamente

expositivas, constitui um desafio recorrente no ensino de Física. Conteúdos que exigem visualização espacial, como planos e direções cristalográficas, frequentemente resultam em aprendizagem mecânica, baseada na memorização de definições e fórmulas (PELIZZARI et al., 2002).

Nesse cenário, a Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel, oferece importantes contribuições para o ensino de conceitos abstratos. Segundo Ausubel, a aprendizagem ocorre de forma mais eficaz quando novos conhecimentos se relacionam, de maneira não arbitrária e substantiva, aos conhecimentos prévios do estudante, denominados subsunçores (AUSUBEL, 2003; MOREIRA, 2010).

Moreira (2010) destaca que a aprendizagem significativa envolve processos de diferenciação progressiva e reconciliação integradora, nos quais os conceitos vão sendo gradualmente refinados e integrados em uma estrutura cognitiva mais estável. Para que esse processo ocorra, é fundamental que o material didático seja potencialmente significativo e que o estudante apresente predisposição para aprender (MOREIRA, 2010).

Nesse contexto, o uso de maquetes tridimensionais configura-se como uma estratégia pedagógica relevante, pois permite a visualização e a manipulação concreta de estruturas cristalinas, reduzindo o nível de abstração dos conceitos. As maquetes podem atuar como organizadores prévios, facilitando a ancoragem cognitiva de novos conhecimentos e favorecendo a construção de significados duradouros (AUSUBEL, 2003; MOREIRA, 2010).

Além disso, a construção e utilização de maquetes possibilitam uma abordagem interdisciplinar, ao integrar conceitos de Física (vetores, estrutura dos sólidos, difração de raios X), Química (estrutura atômica e ligações químicas) e matemática (geometria espacial e representação vetorial). Essa integração está em consonância com as orientações da Base Nacional Comum Curricular, que enfatiza a articulação entre diferentes áreas do conhecimento no Ensino Médio (BNCC, 2024).

A abordagem interdisciplinar contribui para que os estudantes compreendam os fenômenos científicos de forma mais ampla e contextualizada, superando a fragmentação dos conteúdos escolares. Ao relacionar os índices de Miller como vetores e planos cristalográficos por meio de modelos físicos, os estudantes são estimulados a desenvolver habilidades de visualização respeito a geometria espacial, raciocínio lógico e compreensão científica integrada (ZABALA, 2014).

Diante desse contexto, a presente pesquisa teve como objetivos explorar o ensino dos índices de Miller e dos planos cristalográficos através dos vetores e da geometria espacial em sólidos cristalinos, e a construção das estruturas cristalinas metálicas utilizando maquetes tridimensionais com material de baixo custo. Nesse sentido, analisando suas contribuições para a aprendizagem significativa e interdisciplinaridade no Ensino Médio a proposta buscou oferecer subsídios teóricos e metodológicos para a implementação de práticas pedagógicas inovadoras, acessíveis e alinhadas às demandas contemporâneas da educação científica.

2. Fundamentação Teórica

2.1 A teoria de Aprendizagem significativa no Ensino da Física

A teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) desenvolvida pelo psicólogo David Paul Ausubel é um dos pilares da psicologia educacional cognitiva. Seu princípio estabelece: “Se eu tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um único princípio, diria isto: O fator isolado mais importante que influencia o aprendizado é aquilo que o aprendiz já conhece. Determine isso e ensine-o de acordo” (ARAGÃO, 1976).

Pelizzari et al (2002, p.39) aponta-nos algumas vantagens da utilização da teoria ausuberiana:

[...] em primeiro lugar, o conhecimento que se adquire de maneira significativa é retido e lembrado por mais tempo. Em segundo, aumenta a capacidade de aprender outros conteúdos de maneira mais fácil, mesmo se a informação inicial for esquecida. E, em terceiro, uma vez esquecida, fica muito mais fácil relembrar o conhecimento aprendido – reaprendizagem.

De acordo com Marco Antônio Moreira, a aprendizagem significativa ocorre quando ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não arbitrária com aquilo que o aprendente já sabe. O autor esclarece que *substantiva* significa não literal e que *não arbitrária* indica um conhecimento relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende, denominado por Ausubel, como *subsunções* ou ideia-âncora.

E por que essa aprendizagem é significativa? Porque é esse conhecimento específico, existente na estrutura de conhecimentos do sujeito, que permite dar significado a um novo conhecimento, seja de forma mediada, seja pela própria inferência do sujeito. De acordo com Moreira (2010):

É importante reiterar que a aprendizagem significativa se caracteriza pela interação entre conhecimentos prévios e conhecimentos novos, e que essa interação é não literal e não arbitrária. Nesse processo, os novos conhecimentos adquirem significado para o sujeito e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva (MOREIRA, 2010, p. 2)

Quando o conteúdo escolar a ser aprendido não consegue ligar-se a algo já conhecido, ocorre o que Ausubel chama de aprendizagem mecânica, ou seja, quando as novas informações são aprendidas sem interagir com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva. Assim, a pessoa decora fórmulas, leis, mas esquece após a avaliação.

A aprendizagem mecânica é um contraponto importante para entendermos a Teoria de Aprendizagem Significativa. Assim:

Quando o conteúdo escolar a ser aprendido não consegue ligar-se a algo já conhecido, ocorre o que Ausubel chama de Aprendizagem Mecânica, ou seja, quando as novas informações são aprendidas sem interagir com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva. Assim, a pessoa decora fórmulas, leis, mas esquece após a avaliação (PELIZZARI et al, 2002).

Para haver aprendizagem significativa são necessárias duas condições. Em primeiro lugar, o aluno precisa ter uma disposição para aprender: se o indivíduo quiser memorizar o conteúdo arbitrária e literalmente, então a aprendizagem será mecânica. Em segundo, o conteúdo escolar a ser aprendido tem que ser potencialmente significativo, ou seja, ele tem que ser lógico e psicologicamente significativo: o significado lógico depende somente da natureza do conteúdo, e o significado psicológico é uma experiência que cada indivíduo tem. Cada aprendiz faz uma filtragem dos conteúdos que têm significado ou não para si próprio.

A partir da análise da estrutura cognitiva, Ausubel estabeleceu as seguintes condições para a ocorrência da aprendizagem significativa: o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo e o aprendiz deve ter predisposição para aprender.

O material de aprendizagem é potencialmente significativo, pois a atribuição de significado cabe ao sujeito, logo, não há aula, estratégia ou livro significativo. O material potencialmente significativo é aquele capaz de dialogar, de maneira apropriada e relevante, com o conhecimento prévio do estudante (BRASIL, 2020).

Nesse sentido, a aplicação dessa teoria ao ensino de conceitos de cristalografia, como os índices de Miller e os planos cristalográficos em sólidos se apresenta como uma alternativa didática promissora, especialmente quando mediada por recursos concretos, como maquetes tridimensionais.

Os conceitos de estrutura cristalina, planos e índices de Miller não costumam ser tratados abordados no ensino médio, o que dificulta sua compreensão por parte dos estudantes, uma vez que exigem habilidades de visualização espacial e compreensão de representações simbólicas que ainda não estão plenamente consolidadas nesse nível educacional.

Assim, a utilização de maquetes físicas como recurso pedagógico possibilita ao aluno não apenas visualizar, mas também manipular concretamente as estruturas e os planos cristalográficos, favorecendo a formação de imagens mentais mais claras e estáveis, condição essencial para a ancoragem de novos conhecimentos segundo a teoria de Ausubel (MOREIRA, 2011).

Além disso, ao integrar conceitos das disciplinas de física (estrutura dos sólidos e propriedades da matéria, difração de raio-x), química (estrutura atômica e ligações químicas) e matemática (geometria espacial e coordenadas cartesianas), a proposta assume um caráter interdisciplinar que amplia as possibilidades de ancoragem cognitiva, pois articula diferentes saberes que já fazem parte da bagagem intelectual dos estudantes.

Essa articulação interdisciplinar reforça os princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integradora apontados por Ausubel como condições necessárias para que a aprendizagem seja de fato significativa. A diferenciação progressiva ocorre na medida em que os alunos refinam e expandem conceitos já conhecidos, enquanto a reconciliação integradora permite que novas ideias se ajustem coerentemente às estruturas cognitivas existentes, promovendo uma compreensão mais ampla e integrada dos fenômenos estudados.

Outro aspecto relevante é o papel do professor como mediador do processo de aprendizagem. Cabe a ele organizar o conhecimento a ser ensinado de forma sequencial e hierárquica, selecionando estratégias que favoreçam a construção ativa do conhecimento pelos alunos e proporcionando situações que estimulem a reflexão, a curiosidade e o interesse científico. O uso de maquetes, nesse contexto, não deve ser visto apenas como uma atividade manual ou lúdica, mas como um recurso didático intencional, cuja função é facilitar a passagem do concreto para o abstrato, ajudando o aluno a estabelecer relações mais claras entre a representação física dos planos cristalográficos e a notação matemática dos índices de Miller.

Portanto, ao alinhar o ensino de conceitos cristalográficos com a Teoria da Aprendizagem Significativa e ao incorporar recursos concretos como maquetes, promove-se um ambiente propício para a construção de conhecimentos sólidos, duradouros e integrados às estruturas cognitivas dos estudantes. Essa prática, além de tornar a aprendizagem mais acessível e menos abstrata, estimula o desenvolvimento de habilidades importantes como a visualização espacial, o raciocínio lógico e a compreensão interdisciplinar dos fenômenos naturais.

Nesse sentido, o uso de maquetes tridimensionais no ensino de cristalografia configura-se como uma estratégia pedagógica eficaz, pois atua como um organizador prévio capaz de reduzir o nível de abstração dos conceitos e favorecer a visualização espacial. Além disso, a construção e manipulação das maquetes promovem uma abordagem interdisciplinar, integrando conceitos de Física, Química e Matemática, em consonância com as orientações da BNCC para o Ensino Médio, e contribuindo para a construção de aprendizagens significativas e contextualizadas (BNCC, 2024; ZABALA, 2014).

2.2 Cristalografia e ciências dos materiais

Na Ciência dos Materiais, a compreensão da estrutura cristalina é fundamental para explicar propriedades físicas e químicas dos materiais. Os índices de Miller são utilizados para descrever planos cristalográficos e direções no cristal, podendo ser interpretados como vetores associados à geometria da rede cristalina (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; SHACKELFORD, 2015).

Inserir esses conceitos no Ensino Médio, ainda que de forma introdutória, contribui para a alfabetização científica e tecnológica dos estudantes, aproximando-os de práticas reais da ciência contemporânea.

A alfabetização científica tem sido conceituada como um processo educativo que ultrapassa a simples transmissão de conteúdos e busca desenvolver a compreensão dos princípios científicos, sua construção histórica e suas aplicações sociais (SASSERON, 2025).

Essa perspectiva respalda abordagens pedagógicas que priorizam a contextualização, a resolução de problemas e a integração de saberes, como ocorre na proposta de ensino investigativo adotada neste estudo

O estudo da geometria dos cristais é um tema que, desde o início das investigações das propriedades microscópicas dos sólidos, vem despertando muito interesse. Podemos considerar os cristais como arranjos atômicos ou moleculares, cuja estrutura se repete numa forma periódica em três dimensões (3D). Esta unidade cristalina que se repete chamamos estrutura cristalina.

Uma estrutura cristalina consiste de cópias idênticas de um mesmo motivo físico, chamado base, que é associado aos pontos de uma rede de Bravais. A base é formada por um átomo ou conjunto de átomos. (PUREUR, 2001, p.29).

O estudo das propriedades dos átomos impacta diretamente na compreensão da natureza da estrutura dos sólidos. Os sólidos estão no estado da matéria em que as espécies químicas, sejam elas átomos, moléculas ou íons, são mantidas juntas por diferentes tipos de ligações. (ATKINS; JONES, 2012).

É fundamental conhecer o arranjo estrutural dos átomos na formação dos materiais, uma vez que esse arranjo determina muitas das propriedades desses materiais. Para melhor aproveitamento deste conteúdo, vamos introduzir alguns conceitos importantes, como o de estrutura cristalina, rede cristalina e célula unitária.

Algumas propriedades dos sólidos cristalinos dependem da estrutura da estrutura cristalina do material, ou seja, da maneira como os átomos, íons ou moléculas estão arrançados no espaço. Os cristais formados nesse processo podem ter as mais variadas formas, desde estruturas mais simples – para os metais – até estruturas complexas – para algumas cerâmicas e polímeros.

A rede cristalina é um conceito matemático e infinito em extensão. Em outras palavras, uma rede cristalina é um conjunto de pontos dispostos de acordo com um padrão periódico, ou seja, um arranjo tridimensional de pontos cuja vizinhança é idêntica. Portanto, essas redes são os esqueletos sobre os quais as estruturas cristalinas dos materiais são formadas e os átomos ou grupo de átomos estão posicionados nos pontos dessa rede ou próximos a eles.

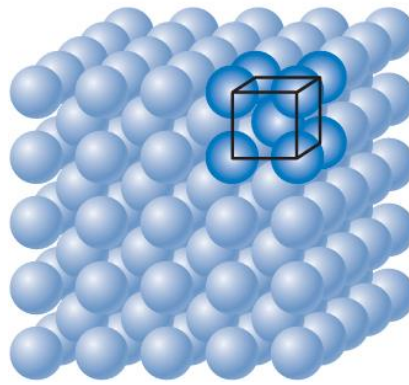


Figura 01: Rede cristalina

Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2016)

Nos sólidos cristalinos, os átomos organizam-se de maneira periódica e ordenada, formando estruturas repetitivas no espaço. Para facilitar o estudo e a compreensão dessa organização, é conveniente dividir a estrutura cristalina em unidades menores que se repetem ao longo de toda a rede. Essas unidades básicas e fundamentais são denominadas células unitárias, sendo responsáveis por representar toda a estrutura do material cristalino.

Com isso, a pesquisa enfatizou de forma introdutória a estrutura cristalina dos metais. A ligação nesse tipo de material é a metálica, não-direcional, ou seja, não há restrições quanto ao número e posições dos vizinhos mais próximos. A estrutura cristalina dos metais tem um número grande de vizinhos e alto empacotamento atômico.

Nessa pesquisa foram utilizadas as estruturas cristalinas mais comuns em metais a cúbica simples, cúbica de corpo centrado e a cúbica de face centrada.

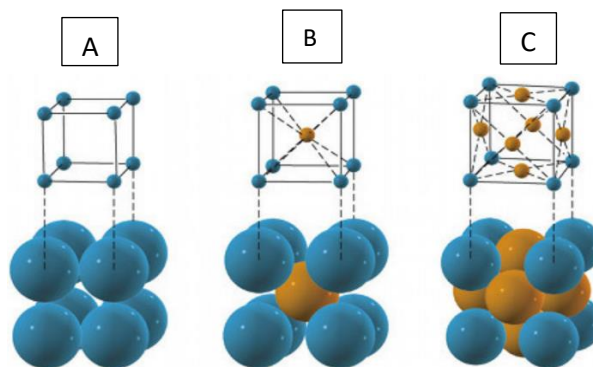


Figura 02: Representações esquemáticas das estruturas cristalinas do tipo A) cúbica simples (CS), B) cúbica de corpo centrado e C) cúbica de face centrada (CFC).

Fonte: *Atomic Arrangement*, Primer in Materials, Weizmann Institute of Science (2017).

2.3 Vetores nos sólidos cristalinos

Na Física, as grandezas podem ser classificadas em escalares e vetoriais, sendo esta última caracterizadas pela presença de módulo, direção e sentido. Grandezas vetoriais, como deslocamento, força e velocidade, são fundamentais para a descrição de fenômenos físicos que ocorrem no espaço

tridimensional. A representação dessas grandezas por meio de vetores permite uma compreensão mais precisa da orientação e da interação entre elementos físicos, tornando-se um recurso essencial na modelagem e interpretação de sistemas físicos (TIPLER; LLEWELLYN, 2014).

A utilização de vetores e do sistema de coordenadas cartesianas possibilita a representação espacial de direções e posições no espaço, o que é particularmente relevante no estudo das estruturas cristalinas. No contexto da cristalografia, as direções cristalográficas podem ser interpretadas como vetores associados aos eixos x , y e z da célula unitária, permitindo descrever a organização espacial da rede cristalina. Essa abordagem favorece a visualização tridimensional e a compreensão de conceitos abstratos, especialmente quando associada ao uso de modelos físicos, como maquetes, que auxiliam na construção de imagens mentais estáveis e significativas para os estudantes (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018).

Sob a perspectiva da Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel, o ensino do conceito de vetor aplicado à cristalografia torna-se mais eficaz quando relacionado a conhecimentos prévios dos estudantes, como noções de direção, deslocamento e orientação espacial. Ao associar esses conceitos já conhecidos à representação de direções cristalográficas por vetores, o aluno passa a atribuir significado aos novos conteúdos, evitando a simples memorização de fórmulas. O uso de recursos concretos, como maquetes tridimensionais, favorece a visualização espacial e atua como subsunçores cognitivo, facilitando a ancoragem dos conceitos de vetores, estruturas cristalinas e índices de Miller na estrutura cognitiva dos estudantes (AUSUBEL, 2003; MOREIRA, 2010).

A representação vetorial no espaço tridimensional é amplamente utilizada na Física para descrever posições, deslocamentos e direções em sistemas físicos. Nesse tipo de representação, os vetores são expressos em função de três componentes associadas aos eixos cartesianos x , y e z , o que permite indicar de forma clara o módulo, a direção e o sentido das grandezas vetoriais. Essa abordagem possibilita a análise de fenômenos físicos em três dimensões, sendo fundamental para a compreensão da organização espacial de sistemas físicos e para a modelagem de estruturas que apresentam simetria tridimensional (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

3. Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza qualitativa e quantitativa, com abordagem descritiva e interpretativa, cujo objetivo foi analisar as contribuições de uma proposta didática interdisciplinar baseada no uso de maquetes tridimensionais para o ensino de índices de Miller e planos cristalográficos no Ensino Médio. A investigação buscou compreender tanto os avanços conceituais dos estudantes quanto suas percepções em relação à metodologia adotada.

O estudo foi realizado em uma escola pública da rede estadual do Amapá, a Escola Estadual Mário Quirino da Silva, localizada no município de Macapá-AP. Participaram da pesquisa 33 estudantes da 1ª série do Ensino Médio, com idades entre 15 e 16 anos. A escolha dessa série justifica-se pela afinidade dos conteúdos trabalhados com a área de Ciências da Natureza, especialmente em Física, permitindo também a integração com conhecimentos de Química e Matemática.

A metodologia adotada fundamenta-se nos princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa, de David Ausubel, valorizando os conhecimentos prévios dos estudantes como ponto de partida para a construção de novos significados. Nesse sentido, a proposta didática foi estruturada para promover diferenciação progressiva e reconciliação integradora, utilizando recursos didáticos potencialmente significativos, como maquetes tridimensionais, atividades práticas e situações problemas contextualizadas.

A pesquisa foi organizada em uma sequência didática composta por cinco aulas de 50 minutos cada, conforme descrito abaixo:

A Aula 1 caracterizada pela apresentação da pesquisa, introdução do tema e investigação de conhecimentos prévios, teve como objetivo identificar os subsunçores dos estudantes acerca dos conceitos de cristais, estrutura da matéria e organização atômica e sólidos cristalinos. Nessa etapa, a aula foi expositiva argumentativa onde a pesquisadora utilizou slides, vídeos curtos e finalizou com uma roda de conversa, culminando na aplicação de um questionário diagnóstico, instrumento essencial para mapear concepções iniciais e orientar as estratégias pedagógicas subsequentes, conforme os princípios da Aprendizagem Significativa de Ausubel.

A Aula 2 foi dedicada à construção das maquetes cristalinas, nas quais os estudantes, organizados em grupos, construíram modelos tridimensionais das estruturas cúbicas simples (CS), cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de face centrada (CFC). Para essa atividade cada grupo recebeu um kit didático com materiais de baixo custo, como bolinhas de isopor (32 de 25mm), palitos de churrasco ou palitos de dente (50 unidades), fios de lã, folhas de acetato e cola quente. Essa etapa teve como foco o desenvolvimento da visualização espacial e a identificação da organização dos átomos nas redes cristalinas.

Na Aula 3 ocorreu a introdução formalmente dos índices de Miller, abordando-os como vetores associados às direções cristalográficas. Utilizando as maquetes construídas, os estudantes aprenderam a identificar eixos, interceptos e a calcular os índices de Miller, além de representar direções cristalográficas por meio de vetores. Também foram realizadas representações bidimensionais em folhas quadriculadas, possibilitando a comparação entre modelos 2D e 3D.

A Aula 4 concentrou-se na representação dos planos cristalográficos, utilizando fios de lã, barbantes e folhas de acetato para simular planos dentro das estruturas cúbicas. Os estudantes identificaram os interceptos dos planos com os eixos cartesianos e calcularam os respectivos índices de Miller (hkl), estabelecendo relações entre vetores, planos cristalográficos e propriedades dos materiais. Essa etapa reforçou a interdisciplinaridade e a compreensão geométrica envolvida na cristalografia.

A Aula 5 foi destinada às aplicações e à avaliação da aprendizagem, com ênfase na relação entre os índices de Miller e a difração de raios X (DRX). Foram discutidas aplicações tecnológicas e industriais, estabelecendo conexões entre a geometria interna dos cristais e os picos observados em difratogramas, conforme orientações do produto educacional. Nessa aula, realizou-se a avaliação final, composta por questões objetivas individuais e questões discursivas em grupo, além de rodas de conversa e feedback dos estudantes.

A avaliação da aprendizagem ocorreu de forma diagnóstica, formativa e somativa. A avaliação diagnóstica foi realizada por meio do questionário prévio; a avaliação formativa ocorreu ao longo das aulas, considerando a participação dos estudantes, a construção das maquetes e as discussões em grupo; e a avaliação somativa foi realizada por meio do questionário final, cujas respostas foram analisadas quantitativamente (percentuais) e qualitativamente (análise das respostas discursivas).

Por fim, a análise dos dados foi realizada por meio da tabulação percentual das questões objetivas e da análise qualitativa das respostas discursivas, buscando identificar evidências de aprendizagem significativa. A interpretação dos resultados foi fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e em autores da área de ensino de Ciências, permitindo avaliar a eficácia da sequência didática baseada no uso de maquetes como recurso pedagógico no Ensino Médio.

4. Análise e Discussão dos Resultados

Aula 1 – Conhecimentos Prévios e Introdução à Cristalografia

Esse primeiro encontro teve como objetivo identificar os conhecimentos prévios dos estudantes acerca dos conceitos de cristal, organização interna dos sólidos e noções iniciais relacionadas à estrutura dos materiais. Essa etapa diagnóstica é fundamental na perspectiva da Teoria da Aprendizagem Significativa, uma vez que, segundo Ausubel (2003), a aprendizagem só ocorre de forma significativa quando novas informações se ancoram em conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz.

No momento da apresentação da pesquisa os alunos demonstraram interesse e entusiasmo para participar. À medida que o tema era introduzido na turma mais curiosos os estudantes ficavam por ser tratar de uma tema diferenciado aplicado somente em nível superior. Este tema foi trasladado para o ensino médio de forma introdutória e simplificada.

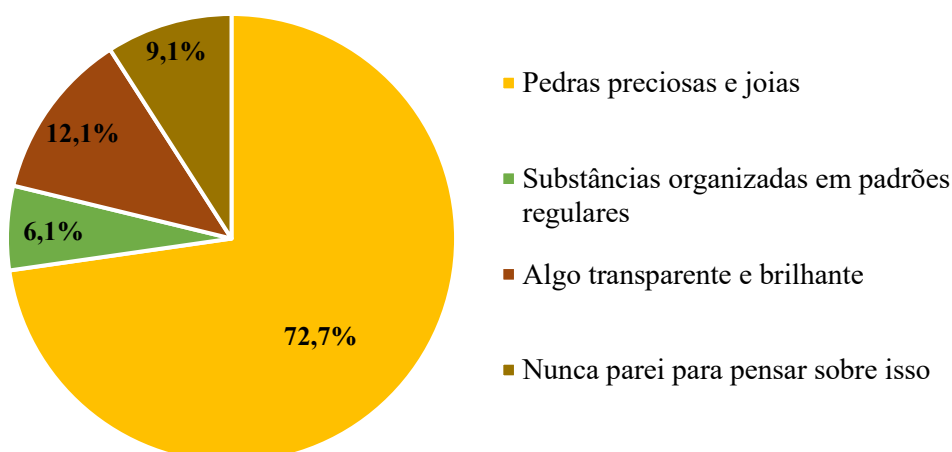
Os dados do questionário diagnóstico revelaram que a compreensão inicial dos estudantes sobre cristalografia estava fortemente associada ao senso comum, com pouca aproximação ao conceito científico adotado pela Ciência dos Materiais. Esse resultado reforça a importância de estratégias didáticas que promovam a diferenciação progressiva dos conceitos ao longo da sequência didática. Os estudantes que participaram da pesquisa foram 33 no total. No quadro 1 temos uma síntese dos principais resultados obtidos diagnóstico.

Quadro 1 – Síntese dos resultados do questionário diagnóstico

Aspecto analisado	Evidência predominante	Percentual (%)
Concepção de cristal	Associação a joias/pedras preciosas	72,7
Compreensão científica do cristal	Organização atômica regular	6,1
Contato prévio com estruturas cristalinas	Aulas de Física/Química	60,6
Organização interna dos sólidos	Incerteza e desconhecimento	54,5
Conhecimento sobre índices de Miller	Nunca ouviram falar	84,8
Uso de modelos tridimensionais	Facilita a compreensão	72,7

Fonte: Autoria própria, 2025.

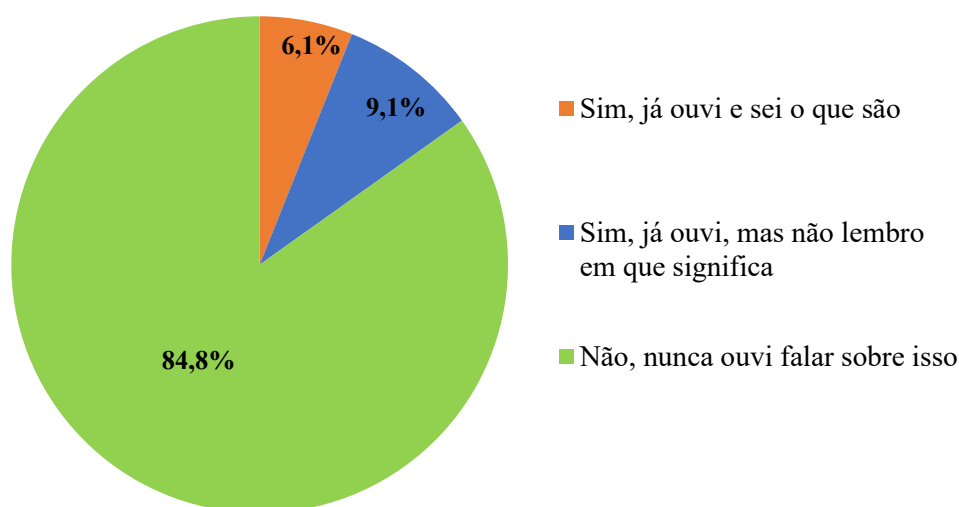
A partir do Quadro 1, observa-se que 72,7% dos estudantes associaram o termo “cristal” a pedras preciosas e joias, enquanto apenas 6,1% apresentaram uma definição próxima à científica, relacionada à organização atômica regular. Esse resultado evidencia a presença de concepções espontâneas, típicas do conhecimento cotidiano, que, segundo Ausubel (2003), podem atuar como subsunçores iniciais quando devidamente problematizadas em sala de aula. A figura 3 demonstra a concepção inicial dos estudantes.

Quando você ouve a palavra cristal, o que vem à sua mente?**Figura 3** – Concepções iniciais dos estudantes sobre o termo “cristal”

Fonte: Autoria própria, 2025.

Do ponto de vista da Ciência dos Materiais, essa concepção limitada dificulta a compreensão da relação entre estrutura interna e propriedades dos materiais, considerada um dos pilares da área (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Assim, a Aula 1 cumpriu um papel fundamental ao tornar explícitas essas concepções, criando condições para sua reconstrução conceitual ao longo das aulas seguintes.

Outro dado relevante aparece na figura 4, onde 84,8% dos estudantes afirmaram nunca ter ouvido falar sobre índice de Miller. Esse resultado era esperado, considerando que esse conteúdo não faz parte do currículo tradicional do ensino médio. No entanto, para aprendizagem significativa, esse dado não representa um obstáculo, mas sim um indicativo claro da necessidade de organizadores prévios, capazes de reduzir o nível de abstração do conteúdo. Para Bransford, Brown e Cocking (2000), a aprendizagem é fortemente influenciada pelo conhecimento prévio dos estudantes, uma vez que novas informações são interpretadas a partir das concepções já existentes.

Você já ouviu falar sobre os índices de Miller?**Figura 4**– Conhecimento prévio dos estudantes sobre índices de Miller

Fonte: Autoria própria, 2025.

Na figura 5, quando perguntados sobre a estrutura cristalina verificou-se que 60,6% dos estudantes relataram já ter ouvido falar em estruturas cristalinas em aulas de física ou química, ainda que de forma superficial. Esse contato prévio fragmentado constitui um ponto de partida relevante, pois permite ao professor reorganizar esses conhecimentos dispersos em uma estrutura conceitual mais coerente, favorecendo a reconciliação integrado.

Segundo análises realizadas sobre a Base Nacional Comum Curricular (BNCC, 2018), o documento normativo estabelece diretrizes que incentivam práticas interdisciplinares, promovendo a articulação entre diferentes áreas do conhecimento e orientando os professores na construção de propostas pedagógicas integradas, com flexibilidade na organização curricular e contextualização dos saberes. Essa perspectiva busca superar a fragmentação disciplinar clássica, propondo um currículo que favoreça o diálogo entre os componentes curriculares e a construção de significados mais amplos para os estudantes (MACÊDO; MACÊDO, 2024).

Você já ouviu falar em estruturas cristalinas? Se sim, onde?

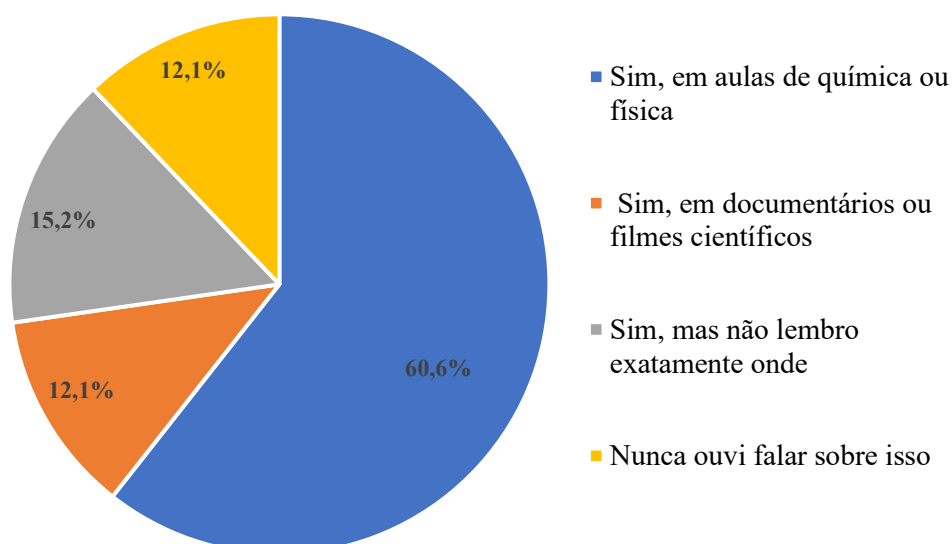


Figura 5-Sobre estrutura cristalinas e os componentes curriculares

Fonte: Autoria própria, 2025.

No que se refere à organização interna dos sólidos, na figura 6 observou-se que apenas 15,2% dos estudantes reconheceram corretamente que todos os sólidos apresentam algum tipo de organização interna, enquanto 45,5% demonstraram incerteza e 9,0 % demonstraram desconhecimento. Esse resultado evidencia uma lacuna conceitual significativa, especialmente considerando que, na Ciência dos Materiais, a compreensão da estrutura interna é essencial para explicar propriedades como dureza, condutividade e resistência mecânica (ASHBY; SHERCLIFF; CEBON, 2019).

Você acha que todos os materiais sólidos possuem uma estrutura organizada?

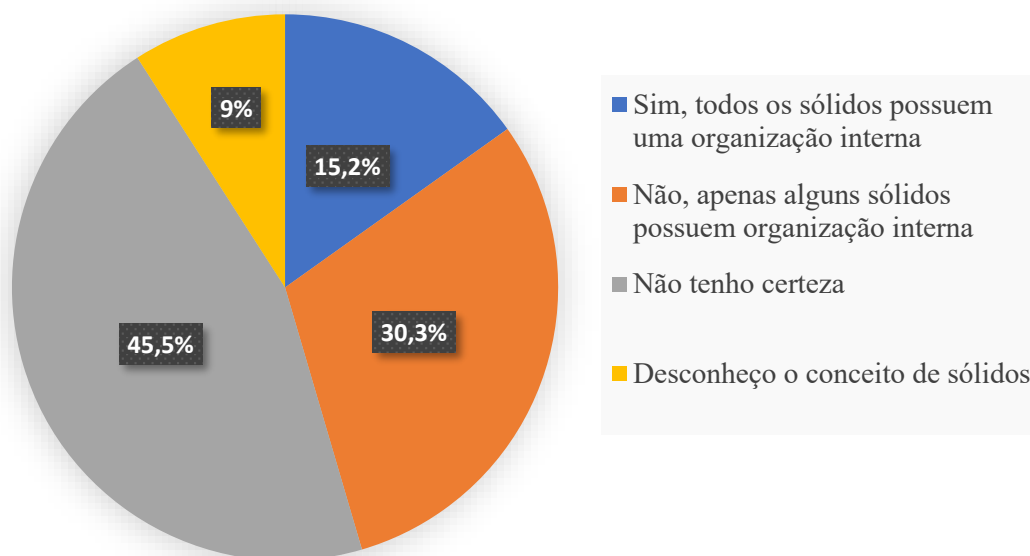


Figura 6- Verificação sobre a estrutura interna dos sólidos

Fonte: Autoria própria, 2025.

Ainda assim, os estudantes demonstraram predisposição para aprender, aspecto indispensável para a aprendizagem significativa. Observe na figura 7 que quando os estudantes foram questionados sobre o uso de modelos tridimensionais, 72,7% afirmaram que a visualização em maquetes facilitaria a compreensão dos conceitos, na figura 8, 54,5% destacaram que modelos físicos ajudam a entender conceitos difíceis de entender apenas por texto ou fórmulas.

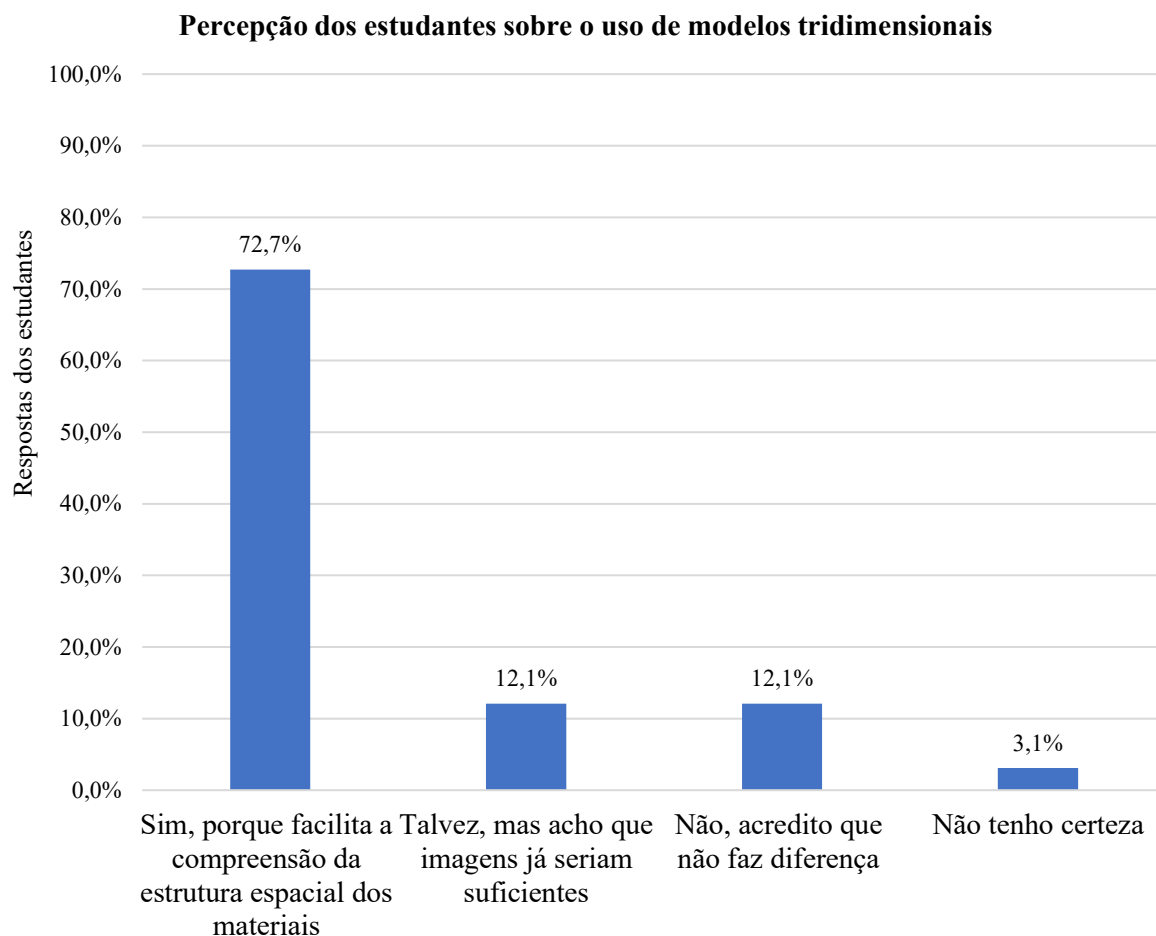


Figura 7- Percepção dos estudantes sobre o uso de modelos tridimensionais

Fonte: Autoria própria, 2025.

O material didático manipulável pode ser compreendido como qualquer instrumento útil ao processo de ensino e aprendizagem (LORENZATO, 2006). Para Passos (2006) Os materiais manipuláveis promovem o envolvimento físico do estudante e atuam como mediadores na construção do conhecimento.

Em sua opinião, quais são as vantagens de aprender ciência usando modelos físicos e maquetes?

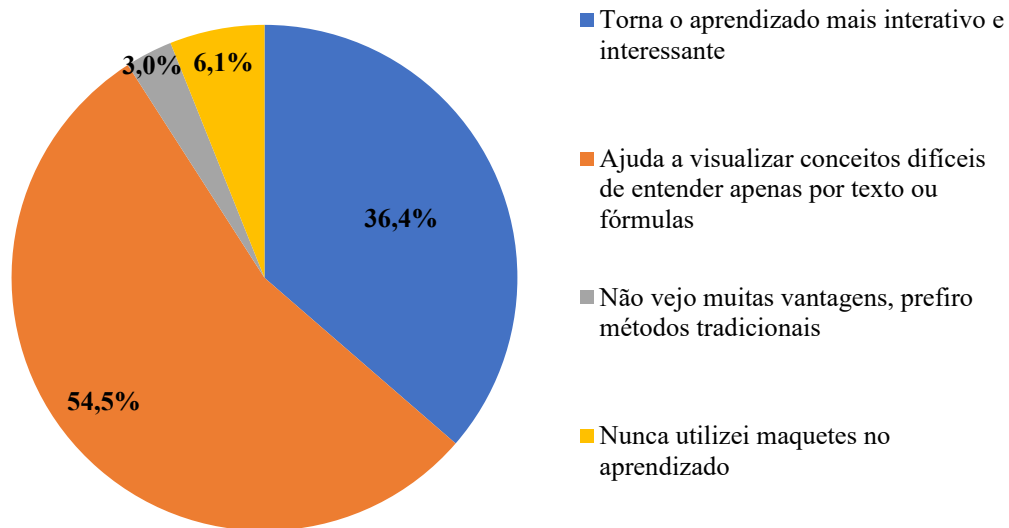


Figura 8- Opinião dos estudantes em relação ao uso de maquetes

Fonte: Autoria própria, 2025.

Para a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), os resultados dessa etapa indicam que os estudantes apresentavam subsunçores iniciais frágeis, porém relevantes, fortemente marcados por concepções do cotidiano. Ao mesmo tempo, evidenciaram predisposição para aprender e reconheceram a necessidade de recursos visuais e concretos para a compreensão dos conceitos.

Do ponto de vista da Ciência dos Materiais, esta etapa cumpriu seu papel introdutório ao explicitar a importância da estrutura interna dos sólidos e ao criar as bases cognitivas necessárias para o estudo das estruturas cristalinas, vetores, planos e índices de Miller. Dessa forma, essa aula constituiu um alicerce essencial para o desenvolvimento das aulas subsequentes, favorecendo processos de diferenciação progressiva, reconciliação integradora e aprendizagem significativa.

Aula 2 – Construção das Maquetes Cristalinas

A Aula 2 teve como objetivo principal promover a visualização e compreensão da organização atômica dos sólidos cristalinos por meio da construção de maquetes tridimensionais representando as estruturas cúbica simples (CS), cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de faces centradas (CFC). Essa etapa constituiu um momento central da sequência didática, pois possibilitou a transição do conhecimento abstrato para o concreto, favorecendo a aprendizagem significativa.

A pesquisadora desenvolveu aula expositiva para a turma com o tema estrutura cristalina dos metais, mostrou imagens em slides e levou amostras de estruturas cúbicas prontas para mostrar aos estudantes como seria a dinâmica da aula. Os alunos também desenharam as estruturas cúbica simples, cúbica de corpo centrado e cúbica de face centrada em folhas quadriculadas e discutiram a aplicação dos conceitos e propriedades de materiais em grupos. Na figura 9, a turma com 33 alunos foi dividida em grupos até 4 componentes. Cada equipe recebeu um kit didático contendo 32 bolinhas

de isopor de 25 mm e 50 palitos de dentes. Os fios de lã e o acetado foram entregues pela pesquisadora depois que as maquetes ficaram prontas.



Figura 9- Kit didático distribuídos por grupos

Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a construção das maquetes, os alunos observaram a diferença entre o modelo bidimensional (2 D) e o modelo tridimensional proposto e construído por eles. Notou-se que 100% dos estudantes concordaram com a eficácia do material didático. Em seguida a investigadora avaliou os estudantes onde resultou na síntese do quadro 2.

Quadro 2 – Síntese dos resultados da Aula 2 (uso das maquetes)

Questão	Perguntas	Evidências de respostas dos estudantes
Q1	Explique por que a construção de maquetes ajuda a entender a organização dos átomos nos sólidos cristalinos.	Os estudantes evidenciaram que as maquetes facilitam a visualização da organização atômica (16 alunos – 48,5%) e destacaram o caráter concreto e manipulável do material, que torna o conteúdo mais compreensível (17 alunos – 51,5%). As respostas indicam que o uso de modelos físicos favoreceu a compreensão de conceitos abstratos.
Q2	Explique uma diferença entre as estruturas cúbica simples (CS), cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de faces centradas (CFC).	As evidências mostram que os estudantes conseguiram diferenciar corretamente as três estruturas cristalinas, seja por meio de uma descrição mais formal (16 alunos – 48,5%) ou utilizando linguagem cotidiana, como “bolinhas nos cantos, no centro e nas faces” (17 alunos – 51,5%), demonstrando apropriação conceitual.
Q3	O que são eixos na estrutura cristalina e por que eles são importantes?	A totalidade dos estudantes (33 alunos – 100%) apresentou respostas corretas, identificando os eixos como linhas de referência que indicam direção e posição dos átomos. Esse resultado evidencia uma compreensão sólida da organização espacial das estruturas cristalinas.

Q4	Compare a representação bidimensional com a tridimensional e diga qual facilita mais o entendimento.	Todos os estudantes (33 alunos – 100%) reconheceram que a representação tridimensional facilita mais o entendimento, destacando a possibilidade de visualizar a estrutura em profundidade e no espaço, o que reforça a importância dos modelos físicos no ensino de conteúdos espaciais.
Q5	Explique a importância do trabalho em grupo na construção das maquetes.	As respostas indicaram que os estudantes compreenderam o trabalho em grupo como elemento fundamental para a aprendizagem, destacando a troca de ideias (15 alunos – 45,5%) e a divisão de tarefas aliada à troca de conhecimentos (18 alunos – 54,5%), evidenciando aprendizagem colaborativa.

Fonte: Autoria própria, 2025.

A síntese das respostas dos alunos está condensada na figura 10, nela mostra os percentuais obtidos para a pesquisa.

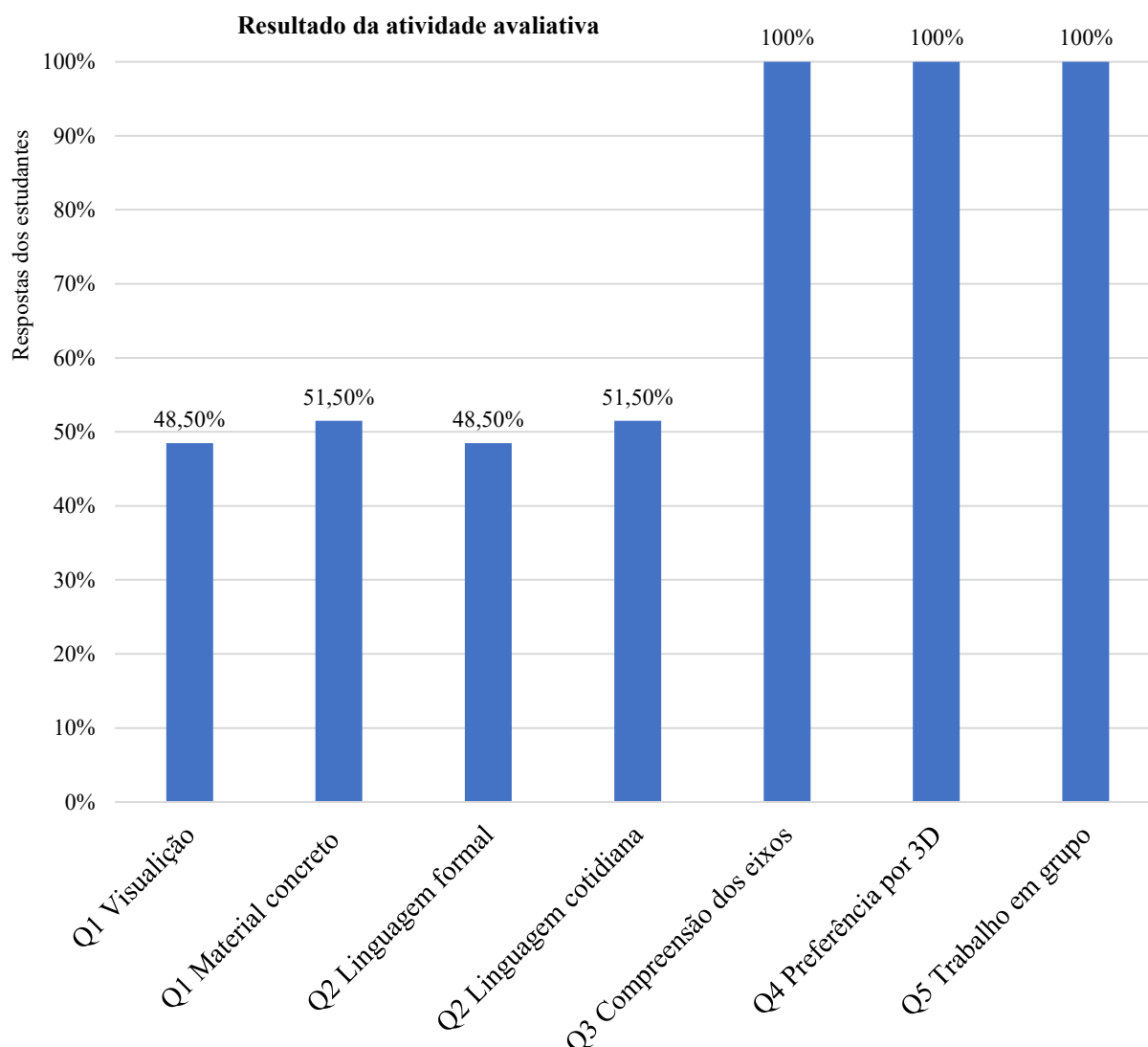


Figura 10- Evidências de aprendizado

Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao analisar as resposta do quadro 2 e os percentuais da figura 10, observou-se que a proposta didática baseada na construção de maquetes cristalinas promoveu avanços significativos na compreensão conceitual dos estudantes do 1ª série do Ensino Médio. Os resultados evidenciam que o uso de materiais manipuláveis, aliado à representação tridimensional e ao trabalho colaborativo, favoreceu a aprendizagem de conteúdos abstratos relacionados à organização atômica dos sólidos cristalinos.

Na Questão 1, observou-se que 100% dos estudantes reconheceram que a construção das maquetes contribuiu para a compreensão da organização dos átomos, sendo que 51,5% destacaram o caráter concreto da atividade e 48,5% enfatizaram a visualização da estrutura atômica. Esses dados indicam que a aprendizagem ocorreu a partir da articulação entre experiência concreta e representação visual. Nesse contexto, as maquetes atuaram como organizadores prévios, possibilitando que os alunos relacionassem conceitos abstratos da cristalografia a experiências sensoriais e manipuláveis.

Em relação à Questão 2, todos os estudantes conseguiram diferenciar corretamente as estruturas cúbica simples (CS), cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de faces centradas (CFC). A presença equilibrada entre respostas com linguagem formal (48,5%) e linguagem cotidiana (51,5%) é um indicativo relevante de aprendizagem conceitual. Conforme argumenta Moreira (2011), quando o estudante é capaz de explicar um conceito com suas próprias palavras, mesmo utilizando termos informais, evidencia-se que houve compreensão significativa e não mera memorização mecânica. Assim, os resultados demonstram apropriação efetiva dos conceitos estruturais das redes cristalinas.

Na Questão 3, referente aos eixos cristalinos, 100% dos alunos apresentaram respostas corretas, identificando-os como linhas de referência que indicam direção e posição dos átomos na estrutura. Esse resultado expressivo reforça a importância da representação tridimensional no desenvolvimento da percepção espacial dos estudantes. Callister e Rethwisch (2016) destacam que a compreensão da organização espacial dos átomos é fundamental para o entendimento das propriedades físicas dos materiais, o que evidencia a pertinência da abordagem adotada nesta atividade.

Os dados da Questão 4 mostram que todos os estudantes reconheceram a superioridade da representação tridimensional em relação à bidimensional para a compreensão das estruturas cristalinas. As respostas indicam que a visualização em profundidade e no espaço foi decisiva para o entendimento do conteúdo. Esse resultado corrobora Zabala (2014), ao afirmar que atividades práticas e concretas favorecem aprendizagens mais duradouras, especialmente quando os conteúdos envolvem abstrações geométricas e espaciais, como é o caso da cristalografia.

Por fim, na Questão 5, os estudantes destacaram a importância do trabalho em grupo, sendo que 54,5% enfatizaram a troca de ideias associada à divisão de tarefas e 45,5% ressaltaram principalmente a troca de ideias. Esses resultados evidenciam que a aprendizagem não ocorreu apenas de forma individual, mas também por meio da interação social. Tal aspecto dialoga diretamente com a perspectiva socioconstrutivista de Vygotsky (2007), segundo a qual o conhecimento é construído nas interações sociais, especialmente quando os estudantes atuam de forma colaborativa na resolução de problemas.

De modo geral, a análise do quadro 2 evidencia que a construção de maquetes cristalinas promoveu condições favoráveis à aprendizagem significativa, ao integrar visualização, manipulação concreta, linguagem acessível e interação social. Esses resultados estão alinhados às orientações da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que enfatiza o protagonismo estudantil, o uso de modelos e a investigação como estratégias fundamentais para o desenvolvimento do pensamento científico (BRASIL, 2018). Assim, a atividade proposta mostrou-se eficaz tanto do ponto de vista pedagógico quanto conceitual, contribuindo de forma consistente para o ensino de Ciências dos Materiais no ensino médio.

Aula 3 – Vetores Cristalográficos e Índices de Miller

A Aula 3 teve como objetivo central promover a compreensão dos vetores cristalográficos e dos índices de Miller, articulando conceitos matemáticos e físicos à estrutura interna dos sólidos cristalinos. Essa aula representou um momento de avanço cognitivo na sequência didática, pois exigiu dos estudantes a transição entre a manipulação concreta das maquetes e a representação simbólica por meio de notações vetoriais e índices (hkl).

Segundo Ausubel (2003), a aprendizagem significativa ocorre quando novos conceitos se ancoram em conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Nesse sentido, os vetores, já trabalhados previamente em Matemática e Física, atuaram como subsunçores estruturantes para a compreensão dos índices de Miller, favorecendo a diferenciação progressiva dos conceitos.

Quadro 3 – Síntese dos resultados da Aula 3 (vetores e índices de Miller)

Aspecto analisado	Evidência predominante	Percentual (%)
Relação entre vetores e índices de Miller	Identificação correta das funções de cada representação	87,9
Compreensão da orientação de planos cristalográficos	Associação correta do plano (110)	81,8
Dificuldade conceitual residual	Confusão entre planos e direções	12,1
Segurança conceitual após a aula	Demonstra compreensão aplicada	81,8

Fonte: Autoria própria, 2025

A análise do Quadro 3 e da figura 11, fica evidente que 87,9% dos estudantes compreenderam corretamente que os vetores representam direções cristalográficas e que os índices de Miller descrevem a orientação de planos no interior do cristal. Esse resultado indica uma superação significativa das dificuldades conceituais identificadas no questionário diagnóstico (figura 4) onde 84,8% dos estudantes desconheciam completamente esses conceitos.

Relação entre Vetores e Índice de Miller

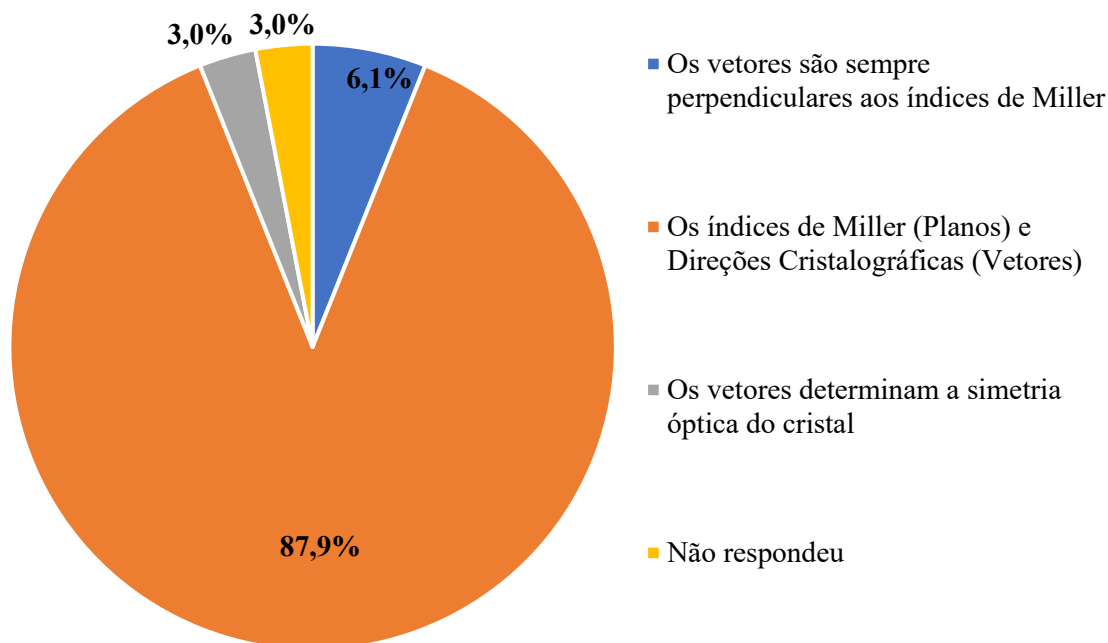


Figura 11 – Relação sobre vetores e índices de Miller

Fonte: Autoria própria, 2025.

Outro resultado relevante refere-se à compreensão da relação entre planos cristalográficos e vetores, especialmente no caso do plano (110). Observou-se na figura 12 que 81,8% dos estudantes conseguiram identificar corretamente sua orientação espacial, associando-a à direção adequada. Esse dado indica que os estudantes foram capazes de articular a notação simbólica dos índices de Miller com a visualização tridimensional proporcionada pelas maquetes.

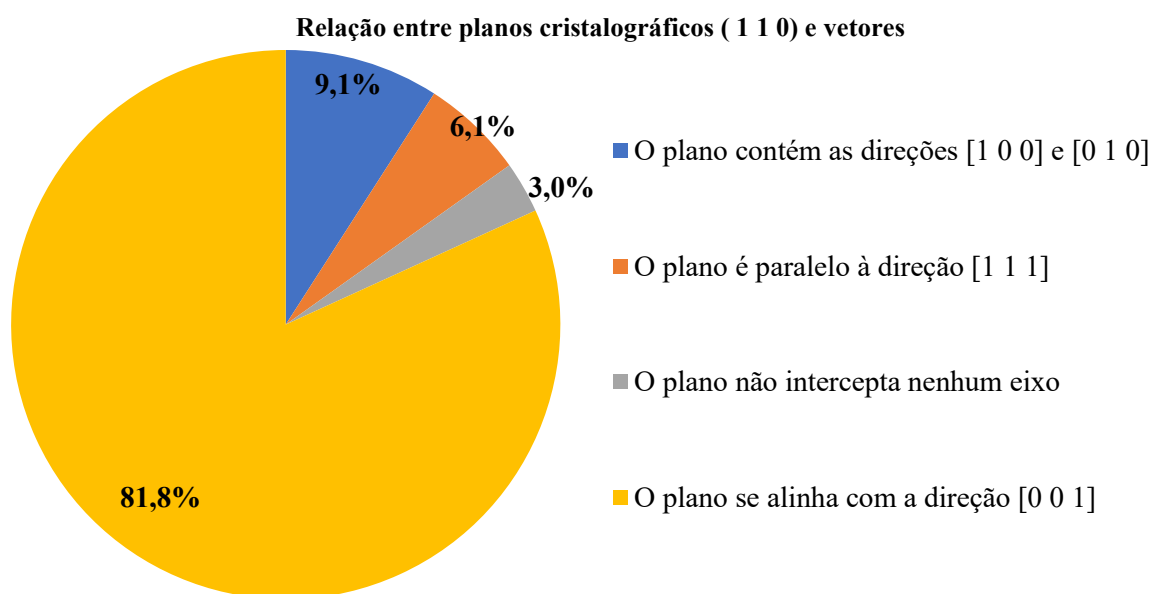


Figura 12- Compreensão da orientação do plano cristalográfico (110)

Fonte: Autoria própria, 2025.

Segundo Novak (2010), a aprendizagem significativa manifesta-se quando o estudante consegue explicar um conceito utilizando diferentes representações. Na Aula 3, essa condição foi atendida, pois os alunos transitaram entre modelo físico, representação gráfica e notação matemática, demonstrando uma compreensão integrada do conteúdo. Conforme afirmam Felcher, Dias e Bierhalz (2015), a maquete física pode ser utilizada como ferramenta didática em qualquer nível de ensino, beneficiando professores e alunos. Essa estratégia é utilizada principalmente como facilitadora da compreensão espacial e como ferramenta interdisciplinar.

Na cristalografia, os vetores são empregados para representar direções e posições no interior da rede cristalina, estando diretamente associados aos eixos cristalográficos. Por meio deles, é possível descrever matematicamente a orientação espacial dos átomos e compreender a simetria e a organização geométrica das estruturas cristalinas (NEVES, 2013).

Além disso, a utilização das maquetes contribuiu para reduzir a carga cognitiva associada à interpretação espacial dos planos e direções, aspecto destacado por Ashby, Shercliff e Cebon (2019) como fundamental no ensino da Ciência dos Materiais.

Essa etapa consolidou a base conceitual necessária para o estudo dos planos cristalográficos e de suas aplicações, abordadas nas aulas subsequentes. Dessa forma, essa etapa cumpriu papel estratégico na sequência didática, preparando cognitivamente os estudantes para compreender a difração de raios X e a caracterização estrutural dos materiais.

Aula 4 – Planos Cristalográficos, Índices de Miller e Difração de Raios X

A Aula 4 teve como objetivo aprofundar a compreensão dos planos cristalográficos, representados pelos índices de Miller, e estabelecer sua relação com a difração de raios X, conectando a geometria interna dos cristais a um fenômeno físico real utilizado na caracterização de materiais. Essa aula representou um momento de integração conceitual, no qual os conhecimentos construídos nas aulas anteriores foram articulados de forma mais ampla e aplicada.

Os estudantes utilizaram suas maquetes para formar os plano cristalográficos e fazer exercícios. A investigadora abordou temas como difração de raio-x demonstrando através de vídeos e imagens a importância da identificação dos índices de Miller. Enfatizando os efeitos sobre as propriedades dos materiais em especial nos sólidos.

Quadro 4 – Síntese dos resultados da Aula 4 (planos cristalográficos e DRX)

Aspecto analisado	Evidência predominante	Percentual (%)
Função dos índices de Miller na difração	Identificação dos planos responsáveis pelos picos de difração	81,8
Compreensão aplicada dos planos cristalográficos	Relação entre estrutura interna e fenômeno físico	81,8
Reconhecimento da interdisciplinaridade	Integração Física–Química–Matemática	100
Dificuldades conceituais residuais	Confusão entre grandezas físicas e estruturais	18,2

Fonte: Autoria própria, 2025.

A análise do Quadro 4 evidencia que 81,8% dos estudantes compreenderam corretamente que os índices de Miller são utilizados para identificar a orientação dos planos cristalográficos responsáveis pelos picos de difração de raios X. Esse resultado demonstra que a maioria dos estudantes conseguiu relacionar a estrutura microscópica do cristal com um fenômeno físico observável experimentalmente.

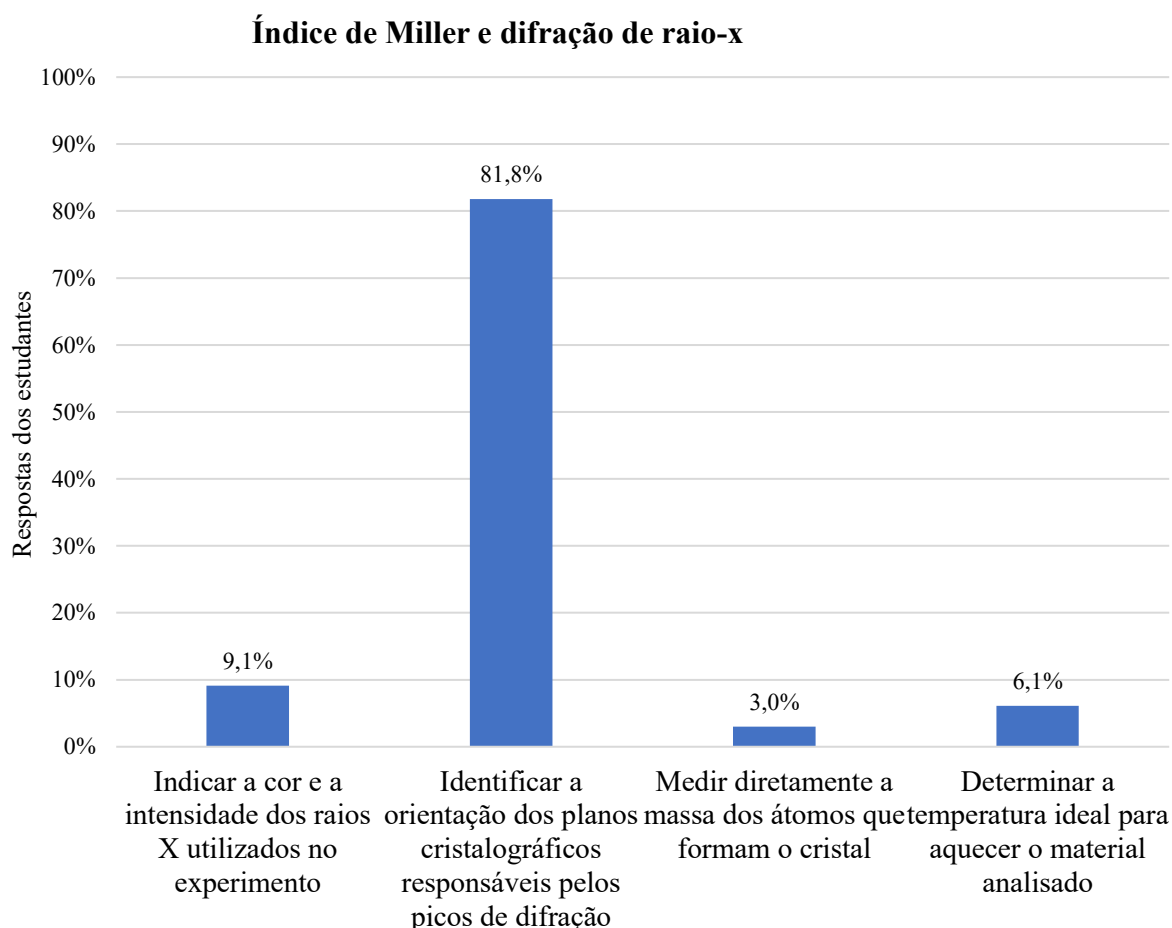


Figura 13- Compreensão do papel dos índices de Miller na difração de raio-X

Fonte: Autoria própria, 2025.

Segundo Callister e Rethwisch (2018) e Shackelford (2015), a difração de raios X é uma das principais técnicas para o estudo da estrutura cristalina dos materiais. Assim, a compreensão desse conceito, ainda que em nível introdutório, representa um avanço significativo na alfabetização científica dos estudantes do Ensino Médio.

Outro resultado relevante refere-se à interdisciplinaridade da proposta. Observou-se que no quadro 4 que 100% dos estudantes reconheceram a existência de interdisciplinaridade, sendo que na tabela 1, 54,5% identificaram explicitamente a integração entre Física, Química e Matemática, enquanto 45,5% reconheceram a articulação entre Física e Química. Esse dado evidencia que os estudantes passaram a compreender a cristalografia como um campo integrado do conhecimento científico.

Tabela 01- Percepção dos estudantes sobre a interdisciplinaridade

Alternativa	Descrição	Nº de respostas	Percentual (%)
A	Física e Química (matéria e átomos)	15	45,5 %
B	Física, Química e Matemática (matéria, átomos e vetores)	18	54,5 %
C	Física e Biologia	0	0,0 %
D	Não existe interdisciplinaridade	0	0,0 %
Total		33	100 %

Fonte: Autoria própria, 2025.

A adoção de práticas interdisciplinares possibilita ao estudante relacionar conceitos de diferentes áreas, tornando a aprendizagem mais contextualizada e próxima da realidade social e científica contemporânea (BORGES-NOJOSA; LIMA; RIBEIRO, 2018)

Aula 5 – Avaliação Final e Consolidação da Aprendizagem

A Aula 5 teve como objetivo consolidar os conhecimentos construídos ao longo da sequência didática e avaliar a aprendizagem dos estudantes acerca das estruturas cristalinas, vetores, planos cristalográficos e índices de Miller, bem como suas aplicações na Ciência dos Materiais. Essa aula assumiu caráter avaliativo, integrador e reflexivo, permitindo verificar se os conceitos foram assimilados de forma significativa.

Dessa forma, os instrumentos avaliativos utilizados na Aula 5 permitiram analisar não apenas a retenção de informações, mas a reorganização da estrutura cognitiva dos alunos.

Nesta etapa os 33 alunos foram divididos em 6 grupos. Foram realizadas cinco questões discursivas. Observe o quadro síntese sobre as perguntas e respostas dos alunos.

Quadro 5 – Síntese dos resultados da Aula 5 (avaliação final)

Questão	Enunciado da questão	Síntese das respostas dos alunos
Q1	Como os vetores cristalográficos e os índices de Miller são aplicados na indústria e na ciência dos materiais?	Os alunos indicaram que os vetores e os índices de Miller são utilizados para identificar e orientar planos e átomos na estrutura cristalina, auxiliando na análise e no estudo dos materiais, especialmente em aplicações científicas e industriais.
Q2	Por que é importante conhecer as direções cristalográficas e os planos dentro de um sólido?	As respostas destacaram que conhecer direções e planos é fundamental porque a estrutura cristalina influencia diretamente as propriedades físicas dos materiais, como resistência, comportamento

		mecânico e outras características.
Q3	Como a utilização de maquetes ajudou na compreensão dos vetores e índices de Miller?	Os estudantes afirmaram que as maquetes facilitaram a visualização dos vetores e planos cristalográficos, tornando o conteúdo menos abstrato e auxiliando na compreensão dos índices de Miller.
Q4	Qual a principal vantagem de usar maquetes para representar estruturas cristalinas?	A principal vantagem apontada foi a possibilidade de visualizar a organização espacial dos átomos em três dimensões, o que contribuiu para entender melhor a estrutura interna dos sólidos cristalinos.
Q5	Você acredita que essa metodologia pode ajudar outros alunos no futuro? Justifique.	Os alunos relataram que a metodologia pode beneficiar outros estudantes por tornar as aulas mais práticas, dinâmicas e fáceis de compreender, favorecendo a aprendizagem dos conteúdos de cristalografia.

Fonte: Autoria própria, 2025.

Avaliação de desempenho dos estudantes

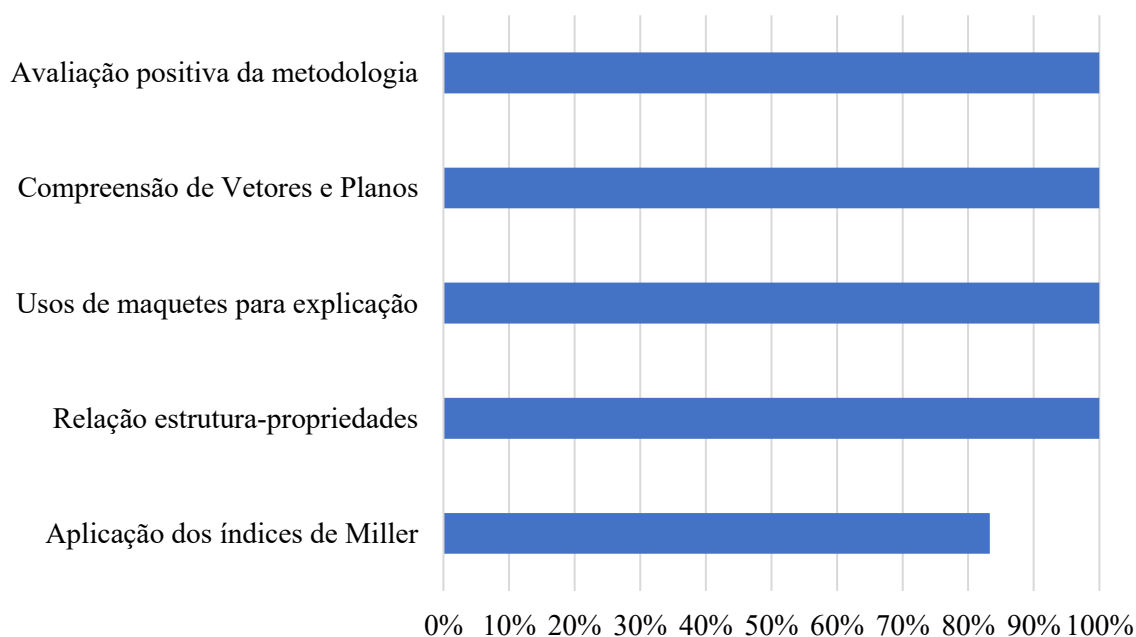


Figura 14- Desempenho dos estudantes na avaliação final

Fonte: Autoria própria, 2025.

A análise da figura 14 evidencia que 83,3% dos estudantes compreenderam corretamente a relação entre vetores cristalográficos e índices de Miller, resultado que confirma a consolidação dos conceitos trabalhados principalmente nas Aulas 3 e 4. Além disso, na figura 13 mostra que 81,8% demonstraram compreender a aplicação dos índices de Miller na difração de raios X, indicando a capacidade de articular a estrutura microscópica dos cristais a um fenômeno físico real.

A Figura 14 apresenta a avaliação de desempenho dos estudantes na Aula 5, etapa final da sequência didática. Observa-se que 100% dos grupos demonstraram compreender a relação entre a estrutura cristalina e as propriedades dos materiais, bem como utilizaram as maquetes como recurso explicativo e reconheceram positivamente a metodologia adotada.

As questões discursivas do questionário final permitiram avaliar a capacidade explicativa e argumentativa dos estudantes, além da percepção sobre a metodologia adotada.

A elevada frequência de respostas que destacam a contribuição das maquetes (100%) evidencia que os modelos físicos atuaram como mediadores cognitivos, facilitando a compreensão de conceitos abstratos. Segundo Novak (2010), a aprendizagem significativa envolve dimensões cognitivas e afetivas, e a valorização da metodologia indica envolvimento ativo dos estudantes no processo de aprendizagem.

Considerações Finais

Este estudo investigou as contribuições de uma sequência didática interdisciplinar, fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa, para o ensino de estruturas cristalinas, vetores, planos cristalográficos e índices de Miller no Ensino Médio, por meio da utilização de maquetes tridimensionais. Os resultados obtidos indicam que a proposta pedagógica foi eficaz na promoção de uma aprendizagem com significado, possibilitando aos estudantes compreender conceitos tradicionalmente considerados abstratos e de difícil assimilação nesse nível de ensino.

A análise dos questionários prévio e final, bem como das atividades discursivas desenvolvidas ao longo das cinco aulas, evidenciou avanços conceituais consistentes. Observou-se que os estudantes passaram de concepções baseadas no senso comum para explicações que articulam estrutura cristalina, propriedades dos materiais e aplicações científicas, aproximando-se dos fundamentos da Ciência dos Materiais. Esses resultados confirmam que o uso de modelos físicos contribui significativamente para a visualização espacial e para a compreensão da organização interna da matéria.

À luz da Teoria da Aprendizagem Significativa, as maquetes atuaram como organizadores prévios concretos, favorecendo a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora dos conceitos. A elevada aceitação da metodologia pelos estudantes e a qualidade das respostas discursivas indicam que os conceitos foram assimilados de forma não mecânica, com atribuição de sentido e capacidade de aplicação em novos contextos.

Além disso, a proposta evidenciou o potencial da interdisciplinaridade entre Física, Química e Matemática, aspecto reconhecido pelos próprios estudantes como elemento facilitador da aprendizagem. Essa integração contribui para uma visão menos fragmentada do conhecimento científico, alinhando-se às diretrizes contemporâneas para o ensino de Ciências.

Portanto, conclui-se que a utilização de maquetes tridimensionais constitui uma estratégia didática viável e eficaz para o ensino de cristalografia no Ensino Médio, ampliando as possibilidades pedagógicas para a abordagem de conteúdos avançados.

Referências

- ARAGÃO, R. M. (1976). *Aprendizagem significativa: fundamentos teóricos e implicações pedagógicas*. São Paulo: Cortez.
- ASHBY, M., SHERCLIFF, H., & CEBON, D. (2019). *Materials: engineering, science, processing and design* (4th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- AUSUBEL, D. P. (2003). *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. Lisboa: Plátano.
- BRANSFORD, J. D., BROWN, A. L., & COCKING, R. R. (Eds.). (2000). *How people learn: brain, mind, experience, and school*. Washington, DC: National Academy Press.
- BRASIL. (2020). *Base Nacional Comum Curricular – BNCC*. Brasília: Ministério da Educação.
- CALLISTER JR., W. D., & RETHWISCH, D. G. (2016). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução* (9. ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- CALLISTER JR., W. D., & RETHWISCH, D. G. (2018). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução* (10. ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- FELCHER, C. D. O., DIAS, L. F., & BIERHALZ, C. D. K. (2015). Construindo maquetes: uma estratégia didática. *EAD em Foco*, 5(2), 149–174.
- GUARIZE, R., et al. (2020). Atividades práticas e ensino de Ciências: contribuições para a aprendizagem significativa. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, 11(3), 1–15.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., & WALKER, J. (2016). *Fundamentos de física: mecânica* (10. ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- LORENZATO, S. (Ed.). (2006). *O laboratório de ensino de matemática na formação de professores*. Campinas, SP: Autores Associados.
- MOREIRA, M. A. (2011). *Teorias de aprendizagem* (2. ed.). São Paulo: EPU.
- MOREIRA, M. A. (2010). *Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo: Centauro.
- NEVES, P. C. P. da. (2013). *Fundamentos da cristalografia*. Canoas: Editora da ULBRA.
- NOVAK, J. D. (2010). *Learning, creating, and using knowledge: concept maps as facilitative tools in schools and corporations*. New York: Routledge.
- PELIZZARI, A., et al. (2002). Teoria da aprendizagem significativa segundo Ausubel. *Revista PEC*, 2(1), 37–42.
- PUREUR, R. (2016). *Ensino de Ciências e aprendizagem significativa*. Porto Alegre: EDIPUCRS.

SASSERON, L. H. (2025). Alfabetização científica na perspectiva das Ciências da Natureza: concepções e implicações para o ensino de Ciências. *Revista Edugeo*, 10(1), 1–15.

SHACKELFORD, J. F. (2015). *Introduction to materials science for engineers* (8th ed.). Upper Saddle River: Pearson.

TIPLER, P. A., & LLEWELLYN, R. A. (2014). *Física moderna* (6. ed.). Rio de Janeiro: LTC.

VIEIRA JUNIOR, N. (2012). *Planejamento de um ambiente virtual de aprendizagem baseado em interfaces dinâmicas e uma aplicação ao estudo de potência elétrica* (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

ZABALA, A. (2014). *A prática educativa: como ensinar*. Porto Alegre: Artmed.