tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

ISSN: 1647-3582

Abordagem didática para o estudo de reações de adição no ensino médio por meio da modelagem e impressão 3D

An educational strategy for teaching addition reactions in high school through 3D modeling and printing

Enfoque didáctico para la enseñanza de las reacciones de adición en la educación secundaria mediante modelado e impresión 3D

Letícia Raquel Amaro dos Santos
Universidade do Estado do Pará
leticia.radsantos@aluno.uepa.br
https://orcid.org/0009-0004-5402-7011

Andréia Francisco Afonso
Universidade Federal de Juiz de Fora
andreia.afonso@ufjf.br
https://orcid.org/0000-0002-0107-2490

Ronilson Freitas de Souza
Universidade do Estado do Pará
ronilson@uepa.br
https://orcid.org/0000-0002-0463-8584

Resumo

A pesquisa desenvolveu uma proposta didática baseada no ensino fundamentado em modelagem e impressão 3D para facilitar a aprendizagem de reações orgânicas de adição no ensino médio. A escolha por essa abordagem deve-se ao seu potencial de tornar conteúdos abstratos mais acessíveis, promovendo a visualização espacial das moléculas e a compreensão dos mecanismos reacionais. Com abordagem qualitativa, de natureza descritiva e do tipo estudo de caso, a intervenção foi realizada com 40 alunos da 3ª série do ensino médio de uma escola pública em Belém, Pará, Brasil. A proposta foi estruturada em três etapas e utilizou como instrumentos de coleta de dados registros em áudio e respostas de testes, analisados por meio da análise de conteúdo e do software IRaMuTeQ. Os resultados indicaram que a proposta auxiliou na compreensão das reações de hidroalogenação, hidratação e hidrogenação, sendo observada uma compreensão mediana das reações de hidroalogenação. A pesquisa contribui para a Educação em Química ao indicar que a inserção de tecnologias como a modelagem e impressão 3D pode favorecer o aprendizado de conceitos abstratos, estimulando o interesse dos alunos e a construção ativa do conheci-

CC BY 4.0

tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

mento. Recomenda-se a realização de novos estudos para aprimorar e ampliar a proposta em diferentes contextos escolares.

Palavras-chave: Tecnologias 3D; Química; Ensino.

Abstract

This research developed a didactic proposal grounded in the use of 3D modeling and printing as a pedagogical strategy to facilitate the learning of organic addition reactions in high school. The adoption of this approach is justified by its potential to render abstract content more accessible, fostering spatial visualization of molecules and a deeper understanding of reaction mechanisms. Employing a qualitative, descriptive, and case study methodology, the intervention was implemented with 40 students from the third year of high school at a public school in Belém, Pará, Brazil. The proposal was structured in three stages and utilized audio recordings and test responses as data collection instruments, which were analyzed through content analysis and the IRaMuTeQ software. The results indicated that the proposal supported students' understanding of hydrohalogenation, hydration, and hydrogenation reactions, although a moderate level of comprehension was noted specifically for hydrohalogenation. This study contributes to the field of Chemistry Education by demonstrating that the incorporation of technologies such as 3D modeling and printing can enhance the learning of abstract concepts, stimulate student engagement, and promote active knowledge construction. Further research is recommended to refine and expand the proposal in diverse educational contexts.

Keywords: 3D Technologies; Chemistry; Education.

Resumen

Esta investigación desarrolló una propuesta didáctica basada en el uso de modelado e impresión 3D como estrategia pedagógica para facilitar el aprendizaje de las reacciones orgánicas de adición en la educación secundaria. La elección de este enfoque se justifica por su potencial para hacer más accesibles los contenidos abstractos, favoreciendo la visualización espacial de las moléculas y la comprensión de los mecanismos de reacción. Con un enfoque cualitativo, de naturaleza descriptiva y de tipo estudio de caso, la intervención se llevó a cabo con 40 estudiantes del tercer curso de educación secundaria en un centro público de Belém, Pará, Brasil. La propuesta se estructuró en tres etapas y empleó grabaciones de audio y respuestas a pruebas como instrumentos de recogida de datos, los cuales fueron analizados mediante análisis de contenido y con el software IRaMuTeQ. Los resultados indicaron que la propuesta facilitó la comprensión de las reacciones de hidrohalogenación, hidratación e hidrogenación, aunque se observó un nivel de comprensión intermedio específicamente en relación con la hidrohalogenación. Esta investigación aporta a la Educación en Química al evidenciar que la incorporación de tecnologías como el modelado y la impresión 3D puede favorecer el aprendizaje de conceptos abstractos, estimular el interés del alumnado y promover la construcción activa del conocimiento. Se recomienda la realización de nuevos estudios que permitan perfeccionar y ampliar la propuesta en distintos contextos escolares.

Palabras clave: Tecnologías 3D; Química; Enseñanza.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Introdução

As reações orgânicas participam de maneira direta na produção de uma vasta gama de produtos presentes no nosso dia a dia, tais como polímeros, borrachas, fertilizantes e medicamentos, combustíveis e materiais sintéticos. Dada sua relevância, torna-se essencial estudá-las explorando suas interações e mecanismos, por meio de estratégias didáticas que proporcionem aos estudantes o desenvolvimento de habilidades, como pensamento crítico e resolução de problemas. Contudo, o processo de ensino e aprendizagem desta temática não é simples, apresentando desafios e especificidades.

A complexidade das reações orgânicas exige dos alunos não apenas a memorização de fórmulas e mecanismos, mas também a compreensão das interações entre moléculas e os fatores que influenciam sua ocorrência (Lima et al., 2022). No entanto, essa compreensão, muitas vezes, é prejudicada pela dificuldade em visualizar estruturas tridimensionais e pela falta de experimentação prática, já que muitas substâncias envolvidas são voláteis, inflamáveis ou tóxicas, limitando sua manipulação em ambiente escolar (Lima et al., 2024).

Além disso, o ensino das reações orgânicas frequentemente se desconecta da realidade dos estudantes, tornando-se um conteúdo abstrato e de difícil assimilação. Este entrave colabora para que a compreensão da temática seja mediada pelo prisma das concepções alternativas, uma vez que, normalmente, os estudantes entendem as reações como “desaparecimento” de determinada substância, “deslocamento” de determinado reagente e“modificação” (Damascena; Carvalho; Silva, 2018).

Nesse cenário, tornar o aprendizado mais significativo exige a contextualização das reações químicas com aplicações do cotidiano. Estratégias pedagógicas como o uso de modelos moleculares, simulações digitais e experimentos simples podem contribuir para um ensino mais dinâmico e eficaz, despertando o interesse dos alunos e facilitando a construção do conhecimento (Fonseca et al., 2024, Carvalho & Souza, 2024). Para superar os desafios de aprendizagem em Química, é fundamental adotar abordagens que articulem os diferentes níveis de representação, promovam a discussão sobre modelos químicos e incentivem o uso da linguagem específica da área (Roque & Silva, 2008).

No caso do ensino de reações orgânicas, isso exige metodologias inovadoras que integrem teoria e prática, proporcionando uma aprendizagem mais significativa, interativa e contextualizada. A aproximação entre os conteúdos e suas aplicações no cotidiano, aliada a recursos didáticos como modelos, simulações e experimentos simples, contribui para tornar os temas mais acessíveis e estimulantes. Essa integração favorece tanto a compreensão conceitual quanto o desenvolvimento do pensamento crítico e da linguagem científica, elementos essenciais na formação dos estudantes do ensino médio.

Nesse contexto, este estudo propõe a articulação entre o Ensino Fundamentado em Modelagem (EFM) e a tecnologia de Impressão 3D como estratégia didática para abordar reações de adição. O EFM se baseia na construção, adaptação e validação de modelos explicativos, exigindo dos alunos um raciocínio progressivo a cada etapa, o que favorece a compreensão de conceitos abstratos (Gilbert & Justi, 2016). A modelagem, por sua vez, tem se consolidado como

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

uma ferramenta eficaz no ensino de Química, especialmente em temas que envolvem estruturas tridimensionais e raciocínio espacial.

Wong, Ip e Ng (2025) ressaltam que muitos estudantes enfrentam dificuldades para compreender estruturas moleculares devido à elevada carga cognitiva envolvida na visualização e no processamento mental de representações tridimensionais. Nesse contexto, o uso de modelos manuseáveis configura-se como uma estratégia eficaz para reduzir essa sobrecarga, ao transformar abstrações em experiências concretas e interativas. Os autores observaram que essa abordagem favorece uma aprendizagem ativa e centrada no aluno, promovendo maior envolvimento com os conteúdos. Os resultados do estudo indicaram não apenas uma melhora significativa no desempenho dos estudantes, mas também um aumento no engajamento e na motivação, especialmente quando comparados aos métodos tradicionais de ensino.

A impressão 3D, nesse cenário, potencializa o uso da modelagem no ensino de Química, ao permitir a construção de representações físicas de estruturas moleculares, como cadeias carbônicas e ligações insaturadas, com proporções realistas entre os átomos. Essa tecnologia favorece a percepção de propriedades como o raio atômico e permite que os modelos representem mais fielmente os aspectos estruturais teóricos, o que contribui para o desenvolvimento da inteligência visuoespacial e para a ampliação da compreensão dos conteúdos.

Estudos como os de Pinger et al. (2019) e Griffith et al. (2016) reforçam a relevância desse recurso no ensino de Química, ao evidenciar que a tecnologia da impressão 3D facilita a visualização de estruturas complexas e promove o raciocínio tridimensional. Além disso, quando os próprios estudantes participam do processo de criação dos modelos, desenvolvem autonomia, criatividade e pensamento crítico, como demonstrado em atividades práticas realizadas com alunos de Química Orgânica.

Diante desse panorama, este estudo busca responder à seguinte questão: qual é a contribuição de uma proposta didática, baseada no EFM aliado à impressão 3D, para a aprendizagem de reações orgânicas de adição no ensino médio em uma escola pública paraense? Para isso, propõe-se elaborar uma proposta didática que utilize o EFM e a impressão 3D para melhorar a aprendizagem desse conteúdo entre alunos do ensino médio.

Percurso metodológico

Esta pesquisa apoia-se na abordagem qualitativa com objetivo exploratório, dispensando a necessidade de listar ou quantificar os dados. Conforme Creswell (2014), a pesquisa qualitativa examina informações coletadas sob uma perspectiva social e humana, valorizando o significado atribuído pelos envolvidos aos fatos observados. Tal abordagem é relevante por permitir uma compreensão mais profunda de variáveis previamente pouco exploradas.

Quanto ao procedimento metodológico, foi utilizado o Estudo de Caso. Segundo Yin (2015, p. 4), “independentemente do campo de interesse, a necessidade distinta da pesquisa de estudo de caso emerge do desejo de compreender fenômenos sociais complexos”, isso possibilita uma

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

análise detalhada das experiências, percepções, interações e dificuldades dos alunos durante o processo de aprendizagem.

No entanto, é importante ressaltar as limitações inerentes ao estudo de caso, especialmente no que se refere à possibilidade de generalização dos resultados. Como enfatiza o próprio Yin (2015), os estudos de caso não têm por objetivo a generalização estatística, mas sim a generalização analítica, ou seja, a ampliação do entendimento teórico sobre determinado fenômeno com base na análise aprofundada de um caso específico. Dessa forma, embora os achados desta pesquisa possam não ser diretamente aplicáveis a outros contextos educacionais, eles oferecem contribuições relevantes para a reflexão sobre práticas pedagógicas inovadoras e o uso de tecnologias no ensino de reações orgânicas.

Quanto ao local de aplicação, a pesquisa foi conduzida em uma escola pública estadual localizada em Belém, Pará, Brasil, cujo IDEB é 3,1. Este índice nacional avalia a qualidade da educação com base na taxa de aprovação e no desempenho dos alunos em exames nacionais. A turma investigada consistiu em 40 estudantes da 3ª série do ensino médio, no turno matutino.

Para estruturar os conteúdos a serem apresentados sobre as reações orgânicas de adição, foi organizada uma intervenção pedagógica, de forma didática e sequenciada em três etapas descritas a seguir:

Na primeira etapa, foram proporcionadas experiências iniciais aos alunos sobre a temática “reações orgânicas”, através de textos de apoio e uma questão norteadora. Essas ferramentas foram utilizadas para direcionar discussões e estimular a elaboração de modelos mentais iniciais.

Por sua vez, a segunda etapa, abordou detalhadamente as reações de adição. Para isso, os alunos foram divididos em grupos e passaram por três momentos distintos: No primeiro momento, questões abertas sobre reações de hidrogenação, hidratação e hidroalogenação foram exploradas com enfoque nos mecanismos envolvidos, permitindo aos estudantes expressar ou reformular seus modelos mentais. No segundo momento, utilizaram o editor de estrutura química KingDraw para testar os modelos elaborados anteriormente, verificando a coerência das estruturas quanto a ligações e disposição espacial das moléculas. O acesso prévio ao KingDraw facilitou a execução das atividades relacionadas à pesquisa. No terceiro momento, os compostos criados no programa, pelos alunos, foram impressos em 3D como peças de encaixe. Após a impressão, os estudantes montaram os compostos usando essas representações impressas, analisando a modelagem e identificando possíveis falhas e, assim, socializando a reação ocorrida.

Na terceira etapa, desenvolveu-se a atividade final de intervenção para avaliar a compreensão conceitual dos alunos. Foram utilizadas questões adaptadas de exames de acesso às universidades brasileiras, abordando reações de adição.

Destaca-se que o processo de modelagem e impressão tridimensional baseou-se nos estudos de Lima et al. (2022) e Penny et al. (2017), que forneceram metodologias para a construção de estruturas químicas tridimensionais utilizando a impressora 3D. Como material, utilizou-se o filamento PLA (Ácido Poliláctico) devido à sua menor propensão a deformidades, alta resistência pós-acabamento e biodegradabilidade.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

O desenvolvimento dos projetos ocorreu no KingDraw, que possibilitou a criação e visualização de estruturas moleculares em 2D e 3D, bem como a edição de moléculas da base de dados. A escolha desse software se deu devido à presença de ferramentas específicas, como setas curvas, notação de carga e símbolos de equilíbrio, facilitando a representação dos mecanismos de reação.

Após a modelagem tridimensional, os arquivos foram salvos no formato MDL (.Mol). Entretanto, moléculas com hibridização sp e sp^2 apresentaram falhas estruturais quando acessadas por modeladores 3D. Para contornar essa limitação, os arquivos foram convertidos para PDB (.pdb) utilizando o programa OpenBabel, que preserva as características tridimensionais das moléculas.

Os arquivos convertidos foram importados para o Blender 3D por meio do add-on "Atomic Blender", ativado nas configurações do programa. Esse recurso permitiu a leitura das coordenadas atômicas tridimensionais em PDB/XYZ e a representação no formato de bolas e bastões. No Blender, configurou-se a representação para "Malha" (Mesh) e ajustaram-se as escalas das bolas e bastões para 0,5 e 1,0, respectivamente. O modelo "Dupliverts" foi mantido, com parâmetros específicos como setor 20, raio 0,1 e unidade 0,05, destacando as ligações e proporcionando uma melhor visualização da estrutura.

No Blender 3D, modificou-se a escala, ajuste das distâncias das ligações, renderização e suavização da malha para posterior importação do projeto em um programa de fatiamento. Sem o uso de uma base de dados pré-existente, o processo de elaboração do modelo de impressão exigiu abordagens específicas. Optou-se pelo modelador 3DSMax, devido à sua precisão e adequação para a construção de peças modulares e encaixáveis na montagem de compostos orgânicos.

O layout inicial do 3DSMax foi configurado para "3D Basic" e a vista alterada para "SW Isometric". Foram utilizados comandos como Box, Extrude, Revolve, Loft, Sweep, Presspull, Union e Intersect para construir sólidos geométricos representando estruturas químicas. Esses comandos permitiram a modelagem por meio de elevações, sobreposições, mesclagens, uniões, subtrações e interseções, garantindo a fidelidade das representações moleculares.

Após a elaboração dos projetos, os arquivos foram salvos na extensão STereoLithography (*.stl) e exportados para um fatiador, convertendo-os para G-Code (.Gcode), permitindo impressão camada por camada com precisão. Os parâmetros utilizados ajustaram-se conforme as especificidades das representações, levando em conta a geometria angular dos átomos e moléculas e os raios atômicos.

Para a coleta de dados, foram utilizados registros em áudio das atividades e respostas escritas dos alunos, com o objetivo de analisar aspectos relacionados à elaboração, reformulação e socialização dos modelos propostos entre os pares. Gravadores foram posicionados estrategicamente na sala de aula durante as duas primeiras etapas da intervenção, com a finalidade de registrar as discussões sobre o objeto em estudo.

Para mitigar possíveis interferências na coleta e análise dos dados, adotaram-se as seguintes estratégias: (i) limitação da mediação docente às intervenções estritamente necessárias, a fim de preservar a autonomia dos grupos durante as discussões; (ii) realização de

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

um momento prévio de ambientação com os recursos tecnológicos, permitindo que os alunos se familiarizassem com os softwares de modelagem e os parâmetros da impressora 3D; e (iii) uso da triangulação de dados — registros em áudio, produções escritas e observações em sala de aula— com o objetivo de ampliar a confiabilidade e a validade das interpretações.

Os dados coletados foram organizados e interpretados com base na análise de conteúdo proposta por Bardin (2016), a qual envolve etapas como pré-análise, exploração do material, tratamento dos resultados, inferência e interpretação. Para auxiliar nesse processo, utilizou-se o software livre IRaMuTeQ, desenvolvido em Python e integrado ao ambiente estatístico R, que possibilita a realização de análises textuais a partir da classificação e agrupamento de categorias. O corpus textual foi preparado conforme os critérios exigidos pelo programa, permitindo a aplicação de técnicas como a Classificação Hierárquica Descendente (CHD) e a Análise Fatorial de Correspondência (AFC). Essa abordagem favoreceu uma leitura sistemática e aprofundada dos dados, contribuindo para a identificação de padrões, recorrências e relações entre os conteúdos analisados.

Na pré-análise, os materiais foram organizados por respostas individuais ou equipes. Textos foram preparados para processamento efetivo no programa, retirando acentos, pontuações e vícios de linguagem, e unindo palavras com underline em casos de hífen, sendo salvos em código UTF-8 sem formatação.

Para a exploração dos dados, utilizou-se a CHD, para obter classes a partir de clusters de segmentos de texto (ST) baseados em vocabulários semelhantes e distintos. Esses agrupamentos refletiram temas recorrentes nas falas dos estudantes, permitindo a identificação de padrões nos discursos. A partir disso, foi possível construir subcategorias que auxiliaram a compreender melhor as percepções e modelos elaborados.

Em seguida, a AFC foi aplicada a fim de visualizar as relações entre as classes e os ST, representando graficamente as distâncias e proximidades dos vocabulários em eixos bidimensionais. Essa técnica foi essencial para verificar o grau de associação entre os temas identificados, reforçando interpretações e contrastes nos achados da pesquisa.

Resultados estatísticos do corpus textual foram decodificados conforme Camargo e Justo (2013), considerando número de textos, ST, formas, ocorrências, lemas e média das formas por segmentos. As análises de CHD exigem uma retenção mínima de 75% do corpus para validade, recomendando tratamento minucioso do texto para evitar dados parciais.

Salienta-se que os textos transcritos das gravações e respostas das atividades foram processados pelo software, originando ST agrupados por contextos semelhantes e distintos, gerando classes. Estas classes foram agrupadas em subcategorias e, finalmente, em categorias apresentando temas centrais da análise.

Durante a aplicação da pesquisa, foram garantidos todos os princípios éticos dos participantes envolvidos no estudo. A pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa em seres Humanos da Universidade do Estado do Pará, Campus VIII-Marabá, com parecer consubstanciado número 6.216. Assim, os nomes dos estudantes foram codificados para garantir o sigilo e anonimato das suas falas.

CC BY 4.0

tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Resultados e discussão

A primeira etapa da sequência teve como objetivo proporcionar aos alunos experiências práticas relacionadas à temática das "reações orgânicas". Para isso, foi utilizado um texto de apoio que abordou reações encontradas no cotidiano dos alunos, com o intuito de direcionar discussões e estimular a elaboração de modelos iniciais. Além disso, a questão norteadora estimulou a reflexão e a interação com a temática apresentada. Mertins, Silva e Amaral-Rosa (2022) destacam outras finalidades dos questionamentos feitos em sala de aula: "i) manter a atenção dos estudantes; ii) avaliar conhecimentos já elaborados; e iii) compreender de que modo os estudantes estão acompanhando a aula" (p. 1568).

Com base no texto, os estudantes foram incumbidos de esboçar uma representação genérica de como compreendiam a ocorrência de uma reação química. Esta etapa alinhou teoria (leitura do texto) e prática (representação).Sobre as representações, Roque e Silva (2008, p. 922) destacam que "os modelos moleculares e suas representações são de extrema importância, não só na química, como na bioquímica, no estudo de macromoléculas naturais como as proteínas. Eles constituem uma linguagem específica dos químicos".Por isso, foi importante essa ação no início da proposta didática.

As respostas dos estudantes nas duscussões, promovidas nessa primeira etapa, foram transcritas conforme os procedimentos exigidos para o tratamento de dados, resultando nas seguintes estatísticas de validação (Figura 1):

Número de textos: 40
Número de ST: 40
Número de formas: 464
Número de ocorrências: 1586
Número de lemas: 357
Número de formas ativas: 300
Número de formas suplementares: 51
Número de formas ativas com a frequência >= 3: 75
Média das formas por segmento: 39.650000
Número de classes : 7
33 Segmentos classificados em 40 (82.50%)

##############################
tempo : 0h 0m 25s
##############################

Figura 1. Resultado da CHD dos modelos iniciais
Fonte: Autores (2025)

O processamento do corpus foi realizado em 25 segundos, sendo classificadas 464 formas, das quais 357 foram aproveitadas, obtendo assim um aproveitamento de 82,50% do total do corpus. Após processamento, foi gerado um dendrograma das classes, que apresenta uma organização hierárquica das categorias e suas conexões, conforme a Figura 2.

CC BY 4.0

tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

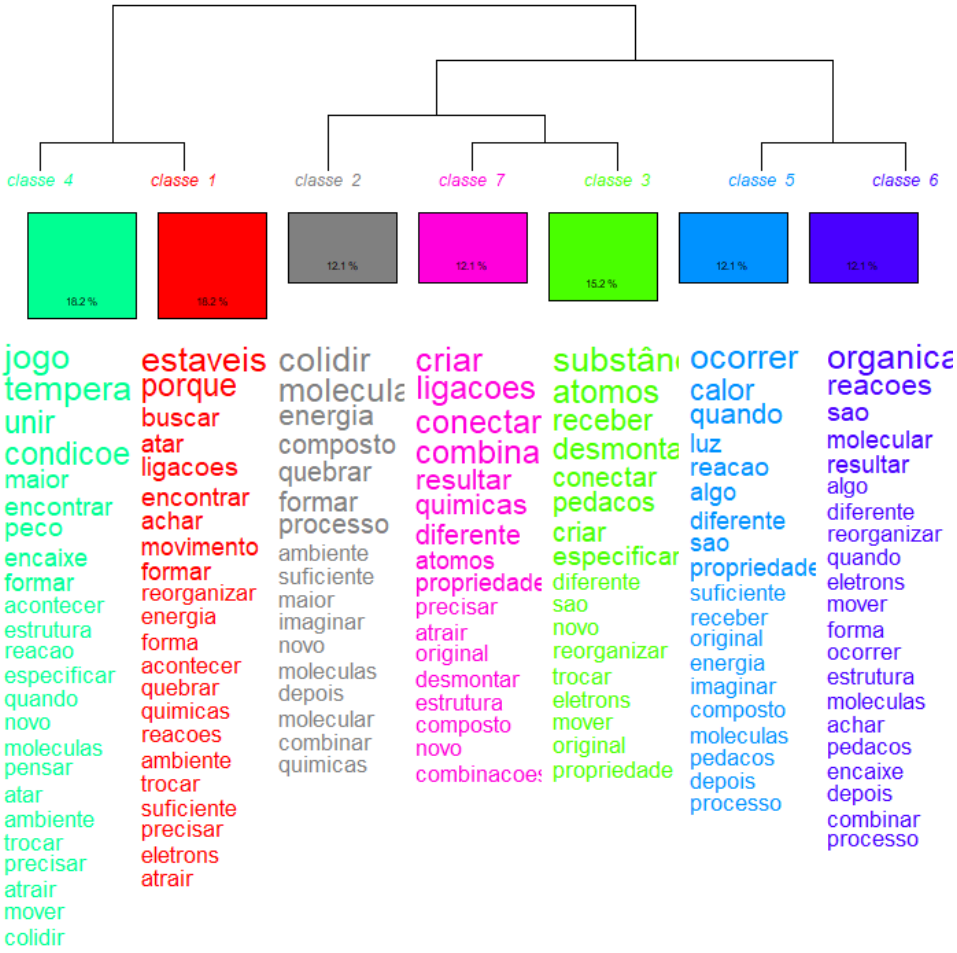

Figura 2. Dendograma das classes referentes aos modelos iniciais
Fonte: Autores (2025)

Observa-se que o corpus resultou em duas categorias: 1ª) Compreensão das dinâmicas das reações orgânicas e 2ª) Aprendizagem sobre as transformações de substâncias.

A primeira categoria, denominada “Compreensão das dinâmicas das reações orgânicas”, aborda os processos relacionados ao rearranjo de elétrons e à dinâmica molecular durante uma reação química. Inclui as seguintes classes: a classe 2 contém termos como “colidir”, “energia”, “molecular” e “processo”, indicando o início de uma reação que ocorre mediante interações moleculares e fornecimento de energia. As classes 7 e 3, derivadas da classe 2, concentram-se no rearranjo eletrônico e na reorganização estrutural das moléculas, destacando termos como “combinar”, “desmontar”, “trocar” e “mover”, os quais sugerem transformações específicas no nível atômico e eletrônico. Em conjunto, essas classes (2, 7 e 3) formam a subcategoria intitulada “En-

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

tendimento sobre reorganização eletrônica", a qual explora o papel do movimento e redistribuição de elétrons nas reações químicas.

Na subcategoria referente ao "entendimento sobre reorganização eletrônica", os estudantes esboçaram a ideia do movimento dos elétrons para a ocorrência de uma reação. Essa ideia não é facilmente construída, como alerta Lima et al. (2024), por isso, destaca-se a importância de atividades que envolvam a representação para que o docente consiga identificar a percepção do estudante e possa intervir, caso necessário.

Alguns mencionaram a possível formação de novas ligações, embora sem detalhar os fatores envolvidos, além de uma possível notação de carga dos elétrons. De modo geral, observa-se uma analogia com peças de encaixe, onde compostos e moléculas são fragmentados e se combinam para realizar uma reação. Analisando as unidades de registro, destacam-se alguns trechos do corpus textual que sustentam a interpretação apresentada e exemplificam a subcategoria criada.

> (...) as moléculas se desmontam e depois se juntam para formar novas substâncias; (...) como uma troca de pedaços onde cada um oferece ou recebe elétrons de outro; (...) possuem polos opostos que mostram como elas se combinam e essa atração faz com que novas ligações sejam criadas (aluno 37, aluno 05; aluno 35, respectivamente).

Ao realizar a análise do trecho anterior, ainda se identifica uma concepção próxima aquela apontada por Damascena, Carvalho e Silva (2018), a qual nas reações orgânicas ocorrem o desaparecimento de determinada substância, deslocamento de determinado reagente e modificação. Essa concepção dialoga com as classes 5 e 6, que se enquadram na subcategoria "Percepção sobre ligações químicas", associada à ideia de quebra e formação de novas ligações.

Termos como "calor", "luz", "energia", "liberar" e "pedaços" indicam as condições e os produtos da reação, sugerindo eventos como absorção ou liberação de energia e alteração da estrutura molecular, indicando um avanço na construção do conhecimento sobre a temática apresentada. Houve a percepção, por parte dos estudantes, desses aspectos, mesmo sem a visualização da reação. A falta de visualização, muitas vezes, torna-se um obstáculo para a aprendizagem (Lima et al., 2024), tornando-se um obstáculo para um entendimento mais amplo das reações orgânicas.

Outra ideia relevante refere-se à quebra e produção de ligações químicas, que reflete a necessidade dessa ruptura para criar espaço para a inserção de novas moléculas. Diferentemente da subcategoria anterior, os estudantes mencionaram luz e calor como catalisadores das reações, elementos que influenciam as propriedades dos produtos. Entretanto, a ideia de fragmentação também se manifesta nesta subcategoria, revelando que, apesar do reconhecimento de fatores externos, os alunos ainda interpretam os compostos através de concepções alternativas. A seguir, são apresentados excertos que expressam essas ideias.

> (...) as moléculas se juntam quando ocorre algo como calor ou luz, ou outra substância para incentivar; (...) ocorre quando as moléculas recebem energia para quebrar as ligações e juntar elas de novo de outra forma; (...) as moléculas explodem ao entrar em contato umas com as outras liberando energia depois os pedaços se juntam (aluno 17; aluno 40; aluno 12, respectivamente).

CC BY 4.0

tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

O uso da palavra “explodem” indica que o aluno entende que a reação ocorre sob uma quantidade consideravel de energia, suficiente para fragmentar as moléculas. Essa concepção se aproxima do que se visualiza em explosões diversas, que são do conhecimento dos alunos.

Por sua vez, a 2ª categoria, “Aprendizagem sobre as transformações de substâncias”, abrange mudanças em substâncias além do rearranjo eletrônico. As classes 1 e 4 complementam as outras ao enfatizar a transformação de substâncias, usando termos como “unir”, “encaixe”, “formar” e “combinações” para indicar a construção de novas estruturas. Isso sugere a integração de moléculas em estruturas maiores, completando o ciclo de transformações químicas.

Para alguns alunos, a transformação ocorre pelo movimento dos elétrons e quebra de ligações, formando novos arranjos sem destruição. Aqui, ao contrário de outras abordagens, a ideia de cinética química é mencionada ao se referirem à “energia”, ainda que indiretamente. Essa concepção é observável nos trechos seguintes.

> (...) as moléculas se encontram em um ambiente cheio de movimento, trocam energia e depois se juntam, por quebra de ligações até formar novas ligações; (...) se encontram em alta temperatura e se misturam, quebrando as ligações e formando uma molécula maior; (...) se chocam em um ambiente com pressão ou energia, e seus átomos trocam de lugar formando novas moléculas (aluno 6; aluno 01; aluno 25, respectivamente).

Alguns desses modelos iniciais foram representados, conforme apresenta a Figura 3.

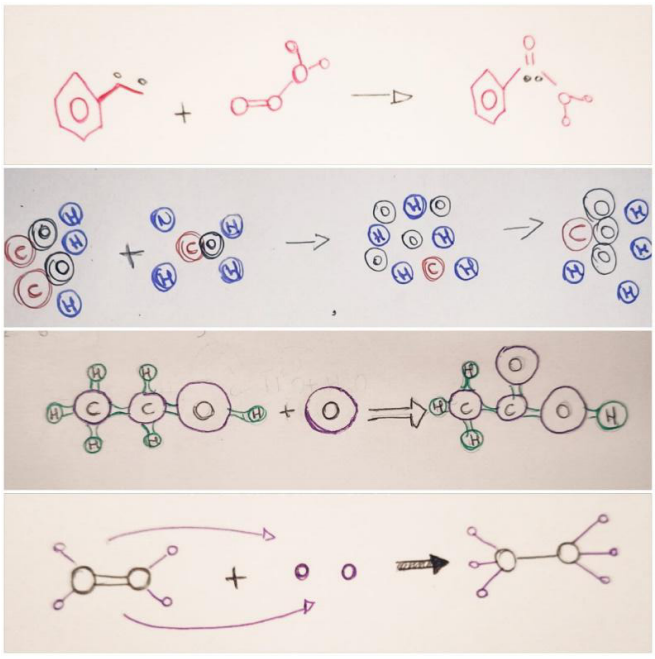

Figura 3. Amostra dos modelos iniciais elaborados
Fonte: Autores (2025)

CC BY 4.0

tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Embora seja possível observar respostas coerentes para o momento da proposta, na qual os alunos apresentam certa compreensão conceitual, observa-se que eles apresentam dificuldade de articular o raciocínio químico com as etapas das reações. De acordo com Watts et al. (2020), este entrave se enfatiza por lacunas conceituais, que implicam na compreensão de princípios químicos, fazendo com que o aluno tenha foco somente em ilustração simbólica, sem preocupações com aspectos coerentes microscopicamente. Fato que ressalta, também, a necessidade de integração dos níveis representacionais.

Pode-se constatar, por meio da observação da análise fatorial de correspondências gerada no IRaMuTeQ (Figura 4), que as classes mencionadas se relacionam conforme a aproximação e distanciamento das palavras destaques nos quadrantes.

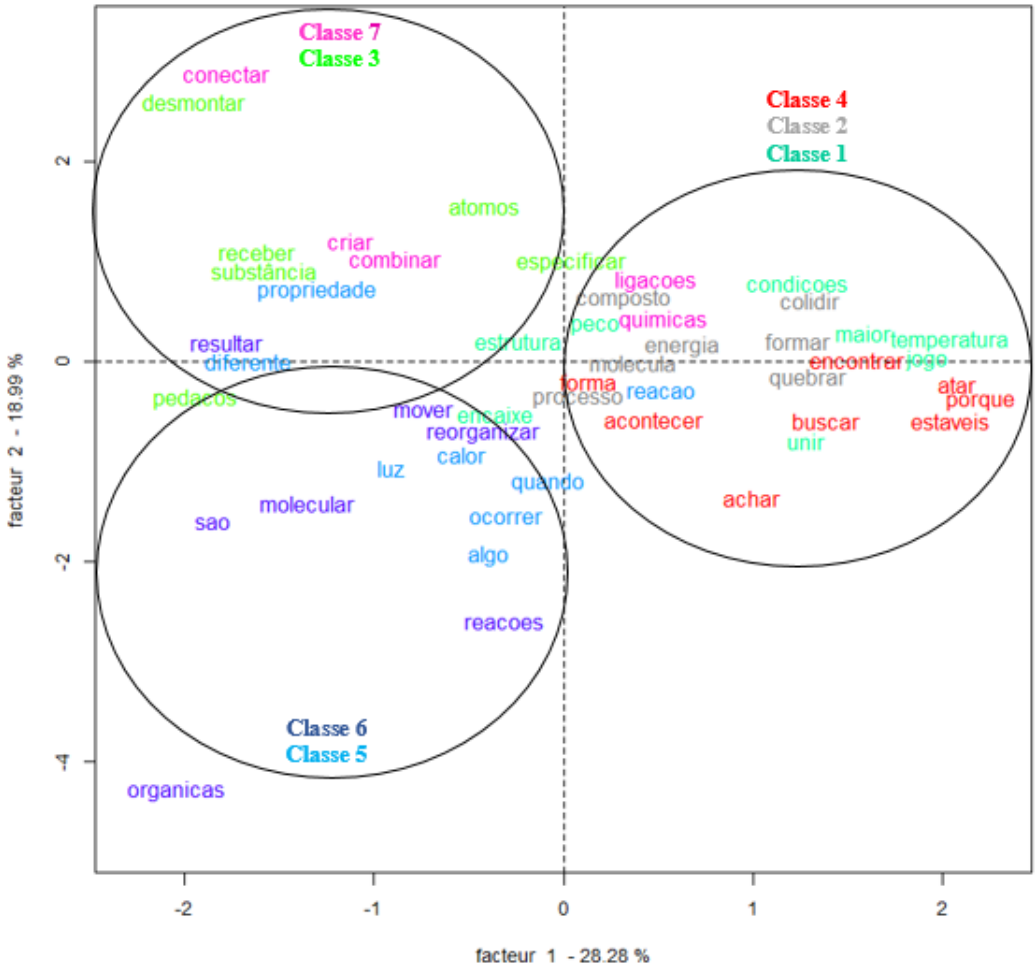

Figura 4. Representação fatorial dos modelos iniciais
Fonte: Autores (2025)

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

O eixo 1 (vertical), que explica 28,28% da variância, representa o principal fator de diferenciação entre as concepções dos estudantes, destacando as ideias mais polarizadas ou contrastantes nas respostas. Já o eixo 2 (horizontal), responsável por 18,99% da variância, adiciona um nível complementar de análise, revelando indicadores adicionais entre os agrupamentos formados.

Ao comparar esses resultados com a análise qualitativa realizada, pode-se inferir que os achados qualitativos têm uma correspondência significativa com os dados quantitativos. Por exemplo, a fragmentação conceitual na compreensão dos estudantes sobre as reações de adição observada qualitativamente, como a separação entre os conceitos de quebra de ligações químicas (classes 5 e 6) e rearranjo de elétrons (classes 7 e 3), embora coerentes individualmente, é corroborada pela distribuição no gráfico, especialmente ao longo do eixo 2, onde essas classes se encontram afastadas em quadrantes opostos, ou seja, não apresentam uma associação clara entre si. Isso sugere que aproximadamente 18,99% da variância quantitativa reflete a polarização central observada qualitativamente.

Os 28,28% explicados pelo eixo 1 trazem uma observação relevante: este eixo separa as classes 1, 2 e 4 das demais, evidenciando que essas classes se encontram próximas no mesmo quadrante. Destaca-se a proximidade entre a 2ª categoria, “Aprendizagem sobre as transformações de substâncias” (classes 1 e 4), e a classe 2, pertencente à subcategoria “Entendimento sobre reorganização eletrônica”. Essa proximidade sugere que os estudantes associam de forma parcial a transformação de substâncias com aspectos relacionados ao rearranjo de elétrons. No entanto, a separação dessas classes das demais indica que essa associação não é integrada com outras ideias, como a quebra de ligações químicas (classes 5 e 6) ou o rearranjo mais amplo de elétrons (classes 7 e 3). Isso nos leva a sugerir que os estudantes têm uma compreensão fragmentada, concentrando-se mais em conexões pontuais entre a transformação de substâncias e o rearranjo eletrônico local, sem articular plenamente os diferentes fatores envolvidos em uma reação química orgânica.

Dessa forma, os achados quantitativos reafirmam a análise qualitativa, conferindo uma perspectiva mais objetiva às tendências observadas. A porcentagem relativamente alta de variância explicada pelos dois eixos (47,27%) sugere que os padrões identificados qualitativamente encontram respaldo estatístico, destacando tanto as conexões estabelecidas quanto a fragmentação nas concepções dos estudantes. Contudo, também reforça que mais da metade da variância (52,73%) permanece associada a outros fatores não explorados diretamente nesta pesquisa, o que pode indicar a necessidade de aprofundar estudos adicionais envolvendo as reações de adição para abarcar essas dimensões.

Contudo, essa proximidade indica que os estudantes tendem a compreender os fatores que contribuem para as reações de maneira isolada, sem integrar completamente os conceitos necessários para explicar a ocorrência de uma reação orgânica. Essa análise reforça a ideia de que o entendimento dos estudantes sobre reações químicas é fragmentado, dificultando a combinação de elementos como quebra de ligações, rearranjo de elétrons e transformação de substâncias em um conceito unificado. Para Menses e Nuñez (2018, p. 176):

> Uma das causas associadas aos erros dos estudantes na compreensão de uma reação química como sistema complexo está relacionada ao modo fragmentado e descontextualizado de se ensinar os conteúdos de química, sem estabelecer uma relação entre os próprios conteúdos da formação

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

> do conceito como também entre outros conteúdos e saberes que não estão relacionados com as vivências do dia a dia dos alunos, promovendo, assim, o ensino de uma ciência pouco significativa e, na maioria das vezes, difícil de ser realmente compreendida e aplicada pelos alunos.

Ressalta-se que as respostas dos alunos se apresentam corretas para uma explicação geral das reações, com ressalva para a referência ao "rearranjo de elétrons das ligações". Com ela, foi possível observar uma confusão acerca da localização dos elétrons, uma vez que foi afirmado que eles estavam presentes nas ligações e não nos átomos. Durante um rearranjo de elétrons em uma reação orgânica, os elétrons estão sendo compartilhados por ligações covalentes entre os átomos (Klein, 2017).

As demais ideias são coerentes, pois em uma reação orgânica ocorre a quebra das ligações nos reagentes iniciais e a formação de novas ligações para gerar os produtos da reação. O objetivo principal é a transformação de substâncias orgânicas para a produção de novos compostos com propriedades específicas. Porém, essas foram ideias gerais que os estudantes não conseguiam aprofundar nesse primeiro momento. Quando questionados sobre como poderia haver uma quebra de ligação ou o rearranjo de átomos, não sabiam explicar com detalhes. Alguns alunos mencionaram fatores como temperatura e pressão, mas sem se aprofundar. Esses detalhes foram desenvolvidos na etapa seguinte.

A dificuldade em aprofundar a explicação sobre a ocorrência de quebras de ligações e demais fatores envolvidos destaca lacunas na aprendizagem de conteúdos de outras áreas da Química que já deveriam ter sido abordados anteriormente (Ferreira Del Pino, 2009), além da necessidade da integração de diversos conceitos para uma boa compreensão dos fenômenos relacionados à temática (Dood; Watts, 2022).

A segunda etapa foi organizada em três momentos de 45 minutos cada, nos quais os alunos foram organizados em grupos, para, assim, terem um melhor acompanhamento. No primeiro momento, foram exploradas questões abertas sobre reações de adição que buscaram direcionar o estudo para os fundamentos envolvidos. No segundo momento, os alunos tiveram que "testar" os modelos elaborados no momento anterior, por meio do editor de estrutura química KingDraw. E, por fim, no terceiro momento, foram utilizadas peças modulares impressas em 3D para realizar a representação das reações.

Visando uma melhor compreensão do processo feito pelos estudantes, foi realizado o estudo de caso do grupo 4, composto por 6 integrantes. A escolha de um único grupo se deu pela homogeneidade das respostas entre os grupos. Um único grupo representa bem o desempenho geral da turma, considerando o desenvolvimento e assiduidade dos alunos. As discussões realizadas, tanto entre alunos quanto entre professores, para expressar, reformular e validar os modelos, foram gravadas e processadas no software para tratamento dos dados.

Neste contexto, para o início desta etapa, foram apresentados os tipos de reações de adição e suas principais características. Durante a explicação, os estudantes apresentaram dúvidas quanto a alguns conceitos básicos para o estudo da temática, como ácidos e bases, nomenclatura de compostos orgânicos e tipos de ligações. Diante disso, foi realizada uma revisão geral desses conceitos antes de dar início às atividades que, posteriormente, se desenvolveram conforme planejado.

CC BY 4.0

tecnologias (digitais) em educação

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

As discussões que esboçaram os primeiros modelos para as reações foram transcritas e processados pelo IRaMuTeQ, com a qual se obtiveram 300 formas, das quais 236 foram aproveitadas, obtendo 87,50% do total do corpus. Após o processamento, foi elaborado um dendrograma das classes (Figura 5).

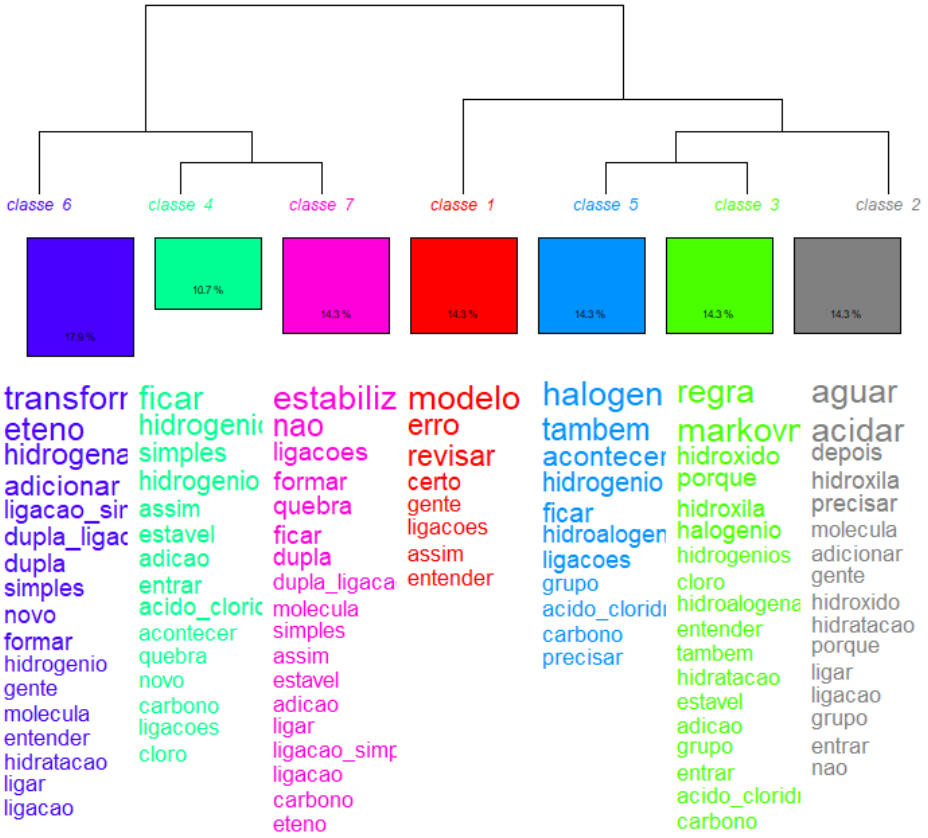

Figura 5. Dendograma das classes referentes aos primeiros modelos expressos
Fonte: Autores (2025)

No dendrograma, observa-se que o corpus foi dividido em duas categorias, contendo 7 classes no total: 1ª) Concepções sobre adição de água e halogênios e a 2ª) Concepções sobre adição em compostos orgânicos. Na primeira categoria, obteve-se a classe 1 e 2, tendo a classe 2 dado origem às classes 5 e 3. Com a análise dos segmentos de texto, é possível inferir que todas as classes desta categoria direcionam para explicações sobre hidroalogenação e hidratação, sendo os modelos que mais precisaram ser reformulados ao longo da proposta, o que é evidenciado com a classe 1. Por sua vez, a segunda deu origem à classe 6 e originou as classes 4 e 7. Com a leitura das palavras em destaque e de seus segmentos dos textos, observam-se ideias para a hidrogenação a partir de concepções gerais de reações de adição.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

A classe 1, apresentou as palavras “modelo”, “erro” e “ligações” em destaque e esboçou modelos com falhas quanto ao número de ligações entre os átomos, em especial, o carbono, que em vários momentos foi mencionado realizando cinco ligações. As classes 5, 3 e 2 apresentaram respectivamente em destaque os termos “halogênios”, “markovnikov”, “acido” e “água” e apontaram modelos para as reações de hidroalogenação e hidratação, com uma concepção simplificada para ambas. Enquanto as classes 6, 4 e 7 destacaram, respectivamente, os termos “transformação”, “hidrogênio” e “estabilização” e apresentaram ideias gerais sobre adição e sobre as reações de hidrogenação, sendo os modelos mais coerentes elaborados pelos estudantes.

No modelo direcionado para a hidrogenação, os estudantes apresentaram a ideia de que a molécula poderia voltar a formar uma dupla ligação após a adição dos hidrogênios, erro que, também, destacou falhas quanto ao número de ligações nos compostos. Porém, destaca-se que nesta reação, os átomos de hidrogênio são adicionados ao composto insaturado, produzindo um composto saturado e, com isso, a molécula atinge uma forma saturada e estável (Klein, 2017).

Por sua vez, para a hidroalogenação, o modelo foi fundamentado na regra de Markovnikov, porém, sem muitas explicações sobre a importância do uso de tal regra. E, no que tange à reação de hidratação, houve uma simplificação excessiva com a ideia de “somente adicionar água”, sem considerar o papel do catalisador na reação e sem identificar o produto.

Durante a representação da reação de hidroalogenação, observou-se que alguns alunos demonstraram dificuldade em compreender por que o hidrogênio se liga ao carbono menos substituído. Por exemplo, ao realizarem a adição de HBr ao propeno, alguns posicionaram o bromo no carbono terminal, o que indica desconhecimento quanto à formação do carbocátion mais estável. Nesse caso, o carbocátion secundário, formado no carbono central, é mais estável que o primário, localizado na extremidade da cadeia, justificando, portanto, a adição do bromo ao carbono mais substituído, conforme prevê a regra de Markovnikov. Essa dificuldade revela não apenas uma simplificação indevida do mecanismo reacional, mas também lacunas na compreensão dos princípios fundamentais da química orgânica.

Essa tendência à simplificação excessiva de conceitos químicos pode levar a interpretações equivocadas e à limitação do desenvolvimento do pensamento crítico. Quando os conceitos são apresentados de forma superficial, os alunos tendem a enfrentar dificuldades para compreender processos mais complexos e abstratos. Como ressaltam Treagust et al. (2018), a compreensão insuficiente dos fundamentos químicos prejudica a construção de competências relacionadas a ideias científicas de maior complexidade, comprometendo a aprendizagem significativa e o avanço conceitual dos estudantes.

Nesse sentido, a compreensão adequada de reações como a hidratação de alcenos também exige atenção à complexidade dos mecanismos envolvidos. Conforme Klein (2017), essa reação ocorre na presença de um meio ácido (H^+), que atua como catalisador ao promover a adição de água à ligação dupla do alceno. O íon hidrogênio ativa a ligação insaturada, facilitando o ataque nucleofílico da molécula de água. O processo segue a regra de Markovnikov, em que o hidrogênio se liga ao carbono menos substituído, enquanto o grupo hidroxila (OH) se adiciona ao carbono mais substituído. A simplificação dessa reação pode prejudicar a compreensão do papel do ácido, que é fundamental não apenas para iniciar a reação, mas também para a formação e estabiliza-

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

ção de intermediários reativos, como o carbocátion. Esses intermediários são essenciais para a continuidade do processo, evidenciando a natureza multietapas e dinâmica das transformações químicas orgânicas

De forma geral, além das falhas observadas, uma dificuldade recorrente em todas as três subcategorias é a falta de entendimento sobre como a adição de um reagente ocorre quando as ligações entre os átomos já estão completas. Esse entrave pode ser atribuído à deficiência na compreensão de conceitos fundamentais, que são essenciais para o entendimento das reações químicas, conforme apontado por Dood e Watts (2022). A compreensão inadequada desses conceitos impede que os estudantes visualizem adequadamente a reestruturação das ligações durante os processos reativos, comprometendo a aprendizagem de mecanismos mais complexos.

Partindo desse contexto, aspectos como a natureza, tipos e rupturas de ligações em compostos orgânicos foram mediados com os estudantes. Com o desenvolvimento da ideia, os alunos chegaram no entendimento da ocorrência de quebra das ligações duplas ou triplas dos compostos insaturados para a formação de compostos saturados no produto, como apresentado na Figura 6.

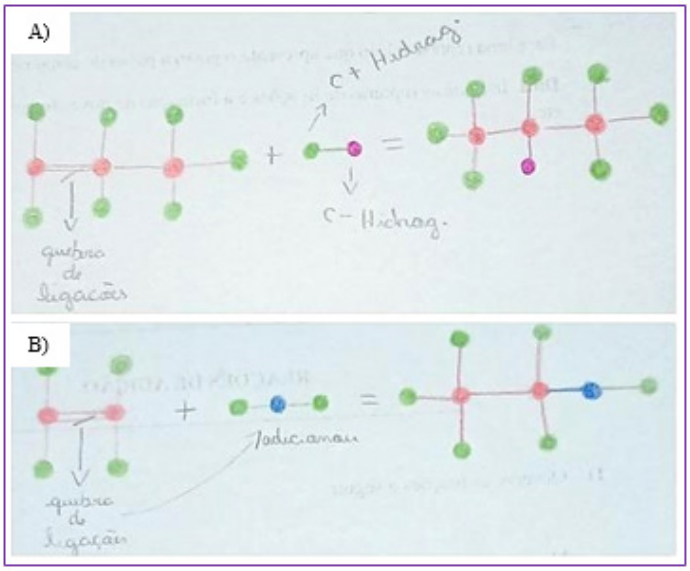

Figura 6 – Amostra de primeiros modelos para as questões abertas. Em A) modelo para reação de hidroalogenação; B) modelo para reação de hidratação
Fonte: Autores (2025)

Contudo, a compreensão de ruptura das ligações pi apresentada pelos alunos veio acompanhada de algumas concepções alternativas mencionadas ainda na etapa I, como a divisão da molécula em fragmentos menores, sem considerar os elétrons e condições específicas, como catalisadores, por exemplo. Além disso, os primeiros modelos não levaram em consideração a geometria das moléculas.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Dessa forma, esse aspecto foi desenvolvido com o uso do software de estruturação molecular e com as peças modulares. A partir do uso das ferramentas, os modelos puderam ser reformulados novamente levando em consideração, em especial, suas disposições espaciais (Figura 7). Contudo, no ensino médio, o estudo dos ângulos de ligação e sua influência nas reações geralmente não é abordado detalhadamente, o que pode justificar a dificuldade dos estudantes em conseguir explicar qual a influência deste aspecto nas reações. Devido a este fato, procurou-se mediar brevemente esta concepção com eles, buscando sanar essa lacuna.

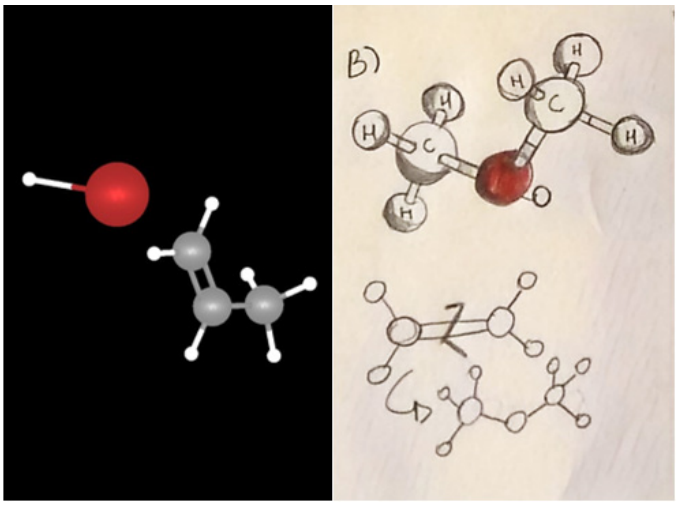

Figura 7 – Exemplo de modelo reformulado com o uso do software
Fonte: Autores (2025)

Ainda com a utilização do software na atividade, os alunos representaram os compostos por meio das peças modulares impressas em 3D com o propósito de refazer o caminho da reação, isto é, explicando seus princípios. Partindo desse contexto, novamente os modelos foram reformulados, desta vez, foi observado que as ligações não são fixas, podendo rotacionar em torno de seus eixos, aspecto que auxiliou no entendimento sobre a geometria das moléculas.

Esse processo de manipulação e reconfiguração dos modelos contribuiu para o desenvolvimento da habilidade de modelagem, compreendida como uma competência que envolve a construção de relações entre representações simbólicas, macroscópicas e submicroscópicas da matéria (Chittleborough & Treagust, 2007). Além disso, a visualização proporcionada pelos modelos tridimensionais tangibiliza aspectos normalmente inacessíveis aos sentidos, favorecendo a formação de imagens mentais mais precisas, especialmente quando combinada com estratégias de ensino que integram múltiplos níveis de representação, como propõe a modelagem digital (Tasker & Dalton, 2006).

Esta contribuição positiva dos modelos impressos em 3D é enfatizada no estudo de Penny et al. (2017), sendo citados para aspectos gerais do ensino de química. Dentre algumas contribuições, ressalta-se como subsídio para uma representação tangível de estruturas, em especial,

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

para uma aprendizagem cinestésica. Visto que a possibilidade dos alunos de manipular e articular os modelos com demais artefatos permite um aprendizado mais abrangente.

Assim, ao manusear as peças e explorar os possíveis (re)arranjos dos compostos (Figura 8), conseguiram descrever melhor sobre os pares de elétrons compartilhados e as ligações. A ideia geral apresentada pelos alunos para as reações de adição propôs que dois compostos se juntem para formar um único produto, sem perder nenhum átomo. Dessa forma, para eles, o que se altera são as ligações e o rearranjo dos átomos por meio da transferência de elétrons entre um composto com "carência" de elétrons e outro "rico" em elétrons.

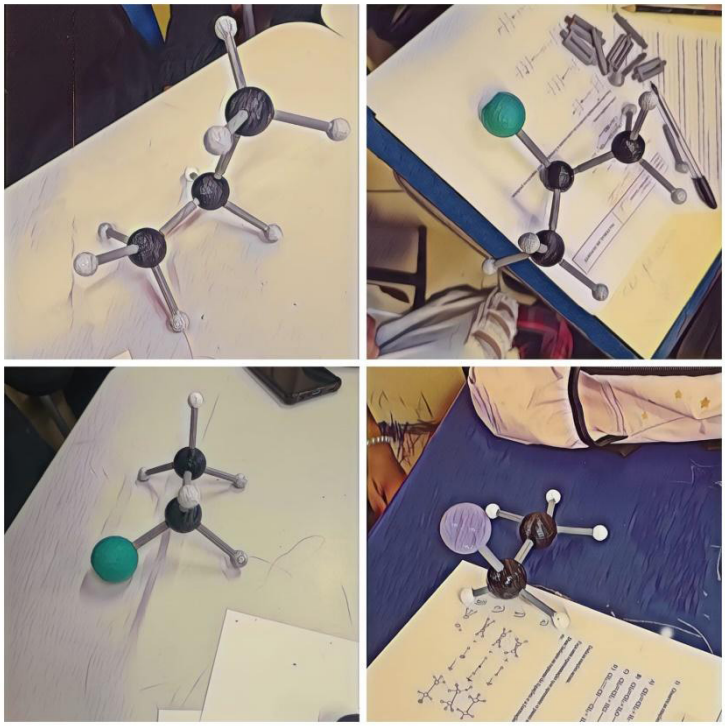

Figura 8 – Modelos elaborados utilizando as peças modulares
Fonte: Autores (2024)

No terceiro momento desta etapa, com a conclusão da reformulação e validação dos modelos, observou-se que a articulação das ferramentas utilizadas em conjunto com a modelagem contribuiu positivamente para a integração dos níveis representacionais propostos por Johnstone (1982). Os estudantes foram capazes de conduzir discussões fundamentando seus argumentos no que visualizavam (com o uso das peças), no que compreendiam (com o uso do software) e representando alguns conceitos de maneira simbólica. Conforme afirmam Gilbert e Justi (2016), a modelagem pode favorecer a construção e validação de argumentos baseados em evidências científicas, pois permite a identificação de padrões e variáveis nos fenômenos estudados.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Neste contexto, por meio da representação fatorial (Figura 9), é possível inferir os principais termos utilizados para chegar aos modelos validados nesse processo. Esses termos estão agrupados no ponto que une os quadrantes; quanto mais próximos desses pontos, mais se enquadram no contexto das discussões, e, quanto mais distantes, mais fora de contexto.

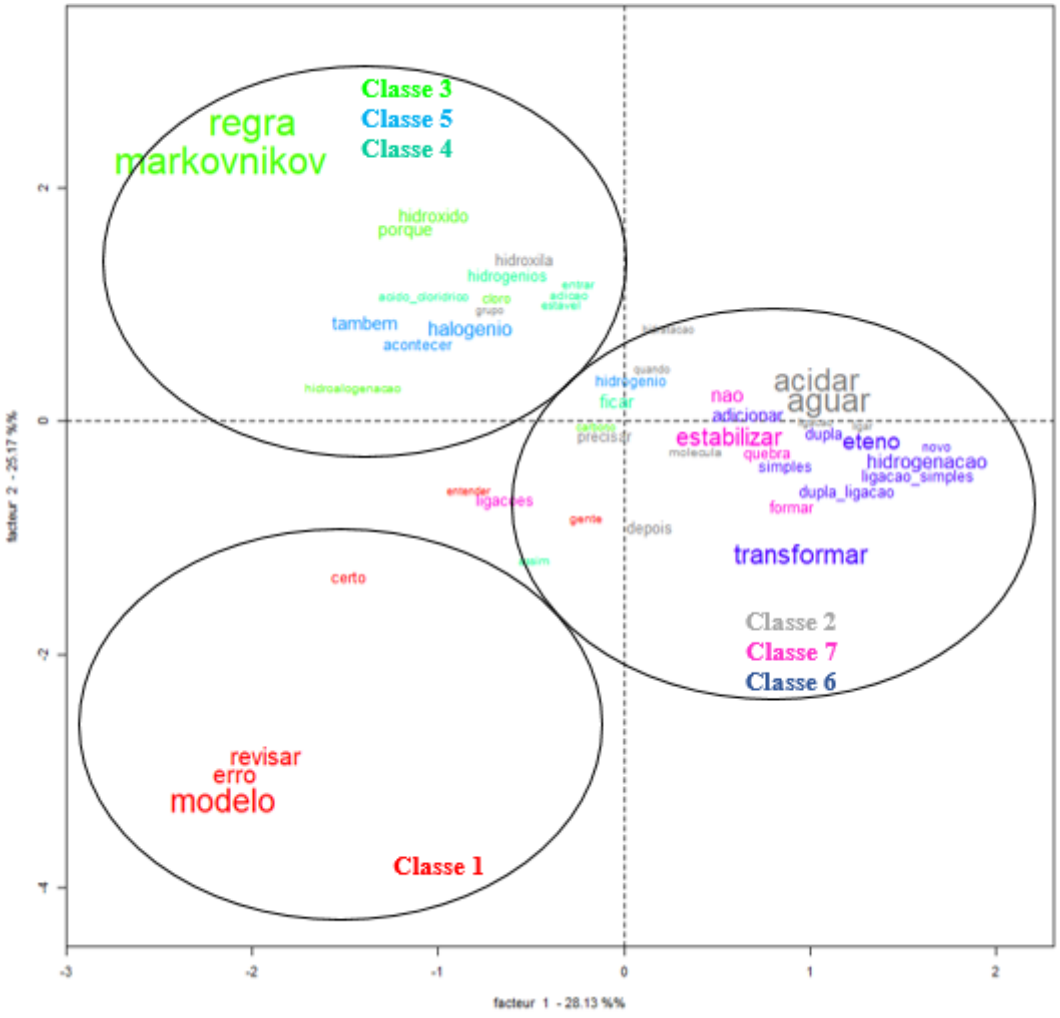

Figura 9 – Representação fatorial da discussão de reformulação e validação dos modelos
Fonte: Autores (2025)

O eixo 1 (28,13% da variância) representa o principal fator de diferenciação nas discussões dos estudantes, revelando as ideias mais contrastantes. Nesse caso, a análise gráfica indica uma separação clara entre os termos relacionados à revisão e aos erros nos modelos (Classe 1), que aparecem isolados no quadrante inferior esquerdo, e os termos centrais das reações

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

químicas, como “quebra”, “transformar” e “estável”, mais próximos ao centro. O que indica que, no decorrer das discussões, os estudantes não se ativeram a observar, revisando os modelos, apenas seguiram com as ideias e a necessidade de reformulação, quando necessário. Fato que não gerou interrupção ou quebra de raciocínio no decorrer do momento. No entanto, é importante destacar que o distanciamento desses termos (“revisar”, “erro” e “modelo”) pode sugerir que os estudantes não priorizaram a reflexão crítica sobre o processo de validação dos modelos. Isso pode ser um ponto de melhoria em atividades futuras, promovendo momentos específicos para revisão e consolidação.

Além disso, o eixo 1 reflete a polarização entre o entendimento da regra de Markovnikov e a aplicação prática dessa regra nos diferentes contextos. A presença destacada do termo “Markovnikov” no quadrante superior esquerdo, em contraste com os termos mais próximos ao centro, sugere que os estudantes tiveram uma compreensão robusta da regra, mas que ela foi discutida de forma separada de outros conceitos principais, como quebra de ligação ou estabilização, sendo mencionado em alguns momentos outros compostos de forma espontânea, além do que foi solicitado, como o propeno e, uma breve discussão sobre o uso de outros halogênios, sendo citados além do cloro (Cl), o bromo (Br) e iodo (I).

Quando se analisa o conjunto de palavras, é possível observar termos gerais como “ganhar” e “perder” em referência aos elétrons, “estável” e “transformar”, sugerem que os estudantes estavam preocupados em aplicar conceitos fundamentais às reações de adição. A ocorrência destes termos indica aspectos aplicados na elaboração de todos os modelos, independentemente do tipo de reação, enfatizando a concepção geral dos estudantes sobre as reações de adição. Além disso, o uso de “dupla ligação” e “quebra” pode indicar que os alunos estavam atentos aos mecanismos moleculares das reações de adição.

O eixo 2 (25,17% da variância) revela uma estrutura conceitual que expõe a fragmentação nas conexões estabelecidas pelos estudantes entre conceitos gerais e mecanismos específicos das reações orgânicas. Observa-se uma progressão entre termos como “transformar” e “estabilizar” até conceitos mais técnicos, como “hidrogenação” e “dupla ligação”. Notadamente, há uma dissociação entre os reagentes e produtos (quadrante superior esquerdo) e os mecanismos de reação que os interligam, como o rearranjo eletrônico descrito pela Regra de Markovnikov. Essa separação é acentuada pela distância conceitual entre “Regra de Markovnikov” e termos como “acidar”, “adicionar” e “transformar” (classes 2, 6 e 7), evidenciando que os estudantes não conseguiram integrar esse conceito ao raciocínio sobre estabilidade dos intermediários ou quebra de ligações.

Essa fragmentação, corroborada também na análise qualitativa, manifesta-se ao longo da sequência didática por meio de dificuldades persistentes em associar a estabilidade dos carbocátions formados com a orientação da adição eletrofílica. Apesar da introdução de modelos moleculares impressos em 3D, parte dos estudantes demonstraram limitações em visualizar dinamicamente os rearranjos moleculares, restringindo-se a representações estáticas. Embora as peças tenham facilitado a manipulação espacial e a percepção da geometria molecular, sua efetividade na integração dos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico foi parcial.

Conforme apontam Babilonia-Rosa et al. (2018), o uso de modelos físicos pode apoiar a integração conceitual, desde que articulado a estratégias pedagógicas que promovam a recons-

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

trução ativa do conhecimento, como esboços e explicações orientadas. Ademais, Barnea e Dori (2000) ressaltam que a eficácia da modelagem, incluindo a modelagem digital, depende da ênfase explícita no caráter representacional e nos limites dos modelos, aspecto essencial para evitar interpretações simplistas ou mecanicistas.

Portanto, a superação das dificuldades identificadas requer não apenas o uso de recursos didáticos que mostre os compostos físicos, mas também a mediação didática voltada à explicitação dos processos moleculares e à promoção de conexões entre os diferentes níveis de representação da Química (Tasker & Dalton, 2006). A análise evidencia que, embora os modelos 3D tenham favorecido aspectos da visualização estrutural, sua contribuição para a compreensão dos mecanismos de reação, em especial os mediados por regras como a de Markovnikov, ainda demanda intervenções pedagógicas mais dirigidas.

Assim como na análise qualitativa, a fragmentação conceitual observada no gráfico reforça a separação de ideias nas discussões. A explicação de 47,3% da variância pelos dois eixos reforça que esses fatores capturam as tendências principais das discussões dos estudantes. No entanto, mais de 50% da variância permanece associada a outros fatores, indicando que as discussões podem ter abordado elementos não explicitamente representados pelos eixos. Isso sugere a importância de aprofundar as análises qualitativas para explorar os conceitos menos evidentes e compreender como fatores externos ou subtópicos influenciaram as concepções dos estudantes.

Na terceira etapa foi destinada para a realização da atividade final da intervenção. O objetivo foi avaliar a compreensão conceitual sobre o conteúdo, adquirido no decorrer da proposta. Para isso, usou-se resolução de questões problemas. Assim, o material se constituiu de duas questões, na qual a primeira visou observar a representação e identificação de uma reação de hidrogenação e, a segunda, teve caráter de verdadeiro ou falso e era direcionada para a análise dos fundamentos de uma reação de hidroalogenção.

As resoluções voltadas para a primeira questão referente ao primeiro problema que solicitava a identificação da reação por meio da nomenclatura do composto e a representação desta de maneira correta., demonstraram respostas satisfatórias, uma vez que a maioria dos alunos conseguiu identificar o tipo de reação e realizar sua representação demonstrando seus fundamentos.

Observou-se que os estudantes compreenderam bem que uma hidrogenação ocorre a partir da adição de hidrogênios ao quebrar uma ligação insaturada de um alceno, transformando-o em um alcano. Alguns alunos mencionaram que este seria um tipo de reação exotérmica, uma vez que ligações são quebradas liberando energia, além de mencionarem sobre possíveis interferências de catalisadores no processo.

> (...) entendi que a ligação dupla é mais fraca que a ligação simples, então quando ela se quebra é substituída por duas ligações simples com hidrogênios; (...) o catalisador não vira produto na reação. Ele só ajuda a reação a ser mais rápida, mas no final continua o mesmo (aluno 27 e 29, respectivamente).

Contudo, a resolução da segunda questão, voltada para reações de hidroalogenação apresentou algumas lacunas, pois se tiveram explicações vagas. Esta segunda questão teve caráter

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

de verdadeiro ou falso para a ocorrência da regra de Markovnikov, adição eletrolítica e formação de carbocátion em uma reação de adição entre um eteno e ácido clorídrico. O item sobre a regra de distribuição foi o que apresentou mais erros, seguido do item referente à formação de carbocátion e, por fim, o item sobre a ocorrência de adição eletrolítica.

Na elaboração das representações, os alunos utilizaram a regra de Markovnikov, porém, não sabiam explicar o porquê de ela ser ou não usada. Observou-se que muitas menções se fizeram valer da seguinte reposta: "a regra de Markovnikov é quando o H se junta ao carbono mais hidrogenado, e o halogênio vai para o carbono menos hidrogenado". Porém, no caso do exemplo usado na questão, a regra não seria aplicada por se tratar de um eteno, ou seja, uma molécula simétrica.

De acordo com Klein (2017), a regra de Markovnikov indica que em uma reação de hidroalogenação, o hidrogênio do H-X, como HCl, se liga ao carbono da dupla ligação que já tem mais hidrogênios, e o halogênio se liga ao carbono menos hidrogenado, devido à formação do carbocátion ser mais estável dessa forma. Uma possível explicação para essas respostas não apresentarem tanta consistência é devido a não abordagem de mecanismos de reações no ensino médio, aspecto importante para entender sobre formação de intermediários estáveis ou não nas reações.

As explicações referentes à formação de carbocátion foram embasadas em concepções alternativas, questão já levantada pelos autores Damascena; Carvalho; Silva, (2018) e ratificadas neste estudo, evidenciando a necessidade de sua superação. No item, os alunos afirmaram que neste tipo de reação, "ocorre uma reequilibração dos positivos e negativos". No entanto, a ideia de "reequilibração" infere que os íons estão continuamente se ajustando de uma forma equilibrada, fato que não acontece na hidroalogenação. Nesta reação, a formação do carbocátion não envolve um equilíbrio entre íons, mas sim a criação temporária de uma carga positiva que é então neutralizada pela adição do halogênio (Klein, 2017),

Ainda na perspectiva de Klein (2017), a formação de um carbocátion é uma etapa intermediária. Dessa forma, quando o H^+ do halogeneto (HX) ataca a ligação insaturada de um alceno, uma ligação pi é quebrada. Com isso, um dos carbonos recebe o H^+, enquanto o outro fica com uma carga positiva, formando o carbocátion. Ou seja, a carga positiva é localizada em um único átomo de carbono, então não há processo de "reequilíbrio", pois as cargas não se distribuem entre os átomos.

Nesta perspectiva, os dados obtidos na etapa final da intervenção indicam que a proposta contribuiu para a compreensão conceitual das reações de adição, com ênfase na hidrogenação. A maioria dos estudantes demonstraram capacidade de identificar corretamente o tipo de reação e representá-la de forma coerente, evidenciando domínio dos princípios fundamentais envolvidos. Observações espontâneas sobre aspectos como a liberação de energia e o uso de catalisadores indicam articulações com conteúdos de termoquímica e cinética química, sinalizando um avanço na integração conceitual entre diferentes tópicos do currículo.

Esses achados dialogam com estudos prévios que destacam o papel da modelagem na promoção da aprendizagem em Química. A integração entre o ensino fundamentado em modelagem (EFM), o uso do software KingDraw e a construção de modelos moleculares por impressão 3D

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

favoreceu tanto a visualização das transformações submicroscópicas quanto a articulação entre os níveis representacionais da Química, simbólico, macroscópico e molecular (Tasker & Dalton, 2006; Babilonia-Rosa et al., 2018). Estudos como os de Barnea e Dori (2000) já haviam apontado que o uso de tecnologias digitais e ambientes interativos de modelagem molecular contribui para o desenvolvimento da percepção de modelos como representações dinâmicas e não meramente ilustrativas, promovendo um raciocínio mais profundo sobre os mecanismos das reações.

Do ponto de vista pedagógico, os resultados reforçam a viabilidade e a efetividade de abordagens que integram recursos digitais e físicos na mediação de conceitos abstratos. A proposta aqui apresentada oferece uma alternativa acessível, visual e interativa, com potencial de aplicação em diferentes contextos do ensino médio, contribuindo para a superação de dificuldades conceituais frequentemente observadas no ensino de reações químicas.

Com base nesses achados, pode-se afirmar que esta pesquisa contribui para o estado do conhecimento tanto sobre o método de ensino, ao evidenciar a efetividade da modelagem e impressão 3D no ensino médio, quanto sobre o conteúdo abordado, ao explorar formas de ensinar reações de adição de maneira visual, ativa e contextualizada. A proposta didática analisada demonstra ser uma alternativa viável e replicável para ampliar a compreensão conceitual de temas abstratos, ao integrar recursos tecnológicos, estratégias investigativas e práticas de visualização, alinhando-se às demandas contemporâneas por inovações no ensino de Ciências.

Conclusões

As evidências obtidas ao longo da intervenção indicam que a proposta didática baseada no Ensino Fundamentado em Modelagem (EFM), aliada ao uso da tecnologia de impressão 3D, configurou-se como uma estratégia eficaz para o ensino de reações orgânicas de adição no contexto do ensino médio, especialmente em uma escola pública do estado do Pará. A abordagem favoreceu a aprendizagem significativa ao integrar teoria e prática por meio de representações visuais e manipuláveis, promovendo maior engajamento dos estudantes.

Durante o desenvolvimento das atividades, foram inicialmente observadas dificuldades relacionadas ao reconhecimento de compostos orgânicos, à compreensão da ionização e à interpretação das transformações químicas envolvidas. Essas barreiras, no entanto, foram gradualmente superadas por meio da mediação docente, do incentivo à troca de ideias entre os alunos e da reconstrução coletiva dos modelos moleculares. A etapa de aplicação da regra de Markovnikov, por sua vez, evidenciou lacunas conceituais persistentes, sugerindo a necessidade de um trabalho mais aprofundado com os fundamentos da reatividade e das propriedades estruturais dos compostos.

A participação ativa dos estudantes foi significativa nas fases de elaboração, socialização e discussão dos modelos tridimensionais, nas quais muitos demonstraram capacidade crítica ao revisar suas representações à luz de novos conhecimentos. A utilização de modelos impressos em 3D possibilitou uma compreensão das dimensões e proporções atômicas, bem como uma melhor visualização das ligações e da geometria molecular, favorecendo o desenvolvimento da inteligência visuoespacial e do raciocínio químico.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Conclui-se que a proposta desenvolvida contribuiu de forma efetiva para o ensino de reações de adição, oferecendo uma alternativa didática que articula conteúdos abstratos com práticas acessíveis e contextualizadas à realidade das escolas públicas. Como contribuição prática, recomenda-se que professores explorem o potencial do EFM em conjunto com recursos como a impressão 3D para fomentar o envolvimento dos estudantes, promover a construção ativa do conhecimento e ampliar a compreensão conceitual de tópicos complexos da Química Orgânica. Sugere-se, ainda, que novas pesquisas sejam realizadas em diferentes contextos educacionais, de modo a testar, aperfeiçoar e expandir os efeitos dessa abordagem no ensino e aprendizagem da Química.

Contribuições dos autores

Conceptualização: Letícia Raquel Amaro dos Santos e Ronilson Freitas de Souza; Metodologia: Letícia Raquel Amaro dos Santos; Software: N/A (não aplicável); Validação: Letícia Raquel Amaro dos Santos; Análise formal: Andréia Francisco Afonso; Investigação: Letícia Raquel Amaro dos Santos; Recursos: Letícia Raquel Amaro dos Santos; Curadoria de dados: Ronilson Freitas de Souza e Andréia Francisco Afonso; Escrita - Esboço original: Letícia Raquel Amaro dos Santos; Escrita - Revisão & Edição: Andréia Francisco Afonso e Ronilson Freitas de Souza; Visualização: Andréia Francisco Afonso ; Supervisão: Ronilson Freitas de Souza; Gestão do projeto: Ronilson Freitas de Souza; Captação de financiamento: N/A (não aplicável).

Financiamento

A Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA), pelo apoio financeiro concedido por meio de uma bolsa de estudo a primeira autora.

Referências

Babilonia-Rosa, M. A., Kuo, H. K., & Oliver-Hoyo, M. T. (2018). Using 3D printed physical models to monitor knowledge integration in biochemistry. *Chemistry Education Research and Practice, 19*(4), 1199-1215.

Barnea, N. & Dori, Yehudit J.(2000). Computerized molecular modeling-The new technology for enhancing model perception among chemistry educators and learners. *Chemistry Education Research and Practice, 1*(1), 109-120.

Bardin, L. (2016). *Análise de conteúdo* (70ª ed.). São Paulo: Edições 70.

Camargo, B.V.,Justo, A.M. (2013). IRaMuTeQ: um software gratuito para análise de dados textuais. *Temas em psicologia, 21*(2), 513-518. https://doi.org/10.9788/TP2013.2-16

Carvalho, A. R., & De Souza, R. F. (2024). Ensino de estereoquímica baseado em modelagem: Inclusão de alunos com a utilização de sementes amazônicas. *Kiri-Kerê - Pesquisa em Ensino, 1*(21). https://doi.org/10.47456/krkr.v1i21.46563

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Chittleborough, G., & Treagust, D. F. (2007). The modelling ability of non-major chemistry students and their understanding of the sub-microscopic level. *Chemistry education research and practice, 8*(3), 274-292.

Creswell, J. W. (2014). I*nvestigação qualitativa e projeto de pesquisa*. Editora Penso.

Damascena, P. M., Carvalho, C. V., & Silva, L. A. (2018). Estratégias didáticas no ensino de Química: Em foco o uso de paródias. *MultiScience Journal, 13*(1), 30–38. https://doi.org/10.33837/msj.v1i13.595

Dood, A., & Watts, F. (2022). Mechanistic reasoning in organic chemistry: a scoping review of how students describe and explain mechanisms in the chemistry education research literature. *Journal of Chemical Education, 8*(99), 2864-2876.

Ferreira, M., & Del Pino, J.C. (2009). Estratégias para o ensino de Química Orgânica no nível médio:uma proposta curricular. *Acta Scientiae, 1*(11), 101-118.

Fonseca, L. G. A., Lima, A.M., Ramos, E.Z., & De Souza, R.F. (2024). Utilização da impressão 3D no ensino de isomeria espacial. *Instrumento: Revista de Estudo e Pesquisa em Educação*, *26*. https://doi.org/10.34019/1984-5499.2024.v26.45813.

Gilbert, J., & Justi, R. (2016). *Modelling-based teaching in science education*. Springer international publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3

Griffith, K. M., Cataldo, R. D., & Fogarty, K. H. (2016). Do-it-yourself: 3D models of hydrogenic orbitals through 3D printing. *Journal of Chemical Education, 93*(9), 1586-1590. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00231

Klein, D. (2017). *Química Orgânica: Uma aprendizagem baseada em solução de problemas*. LTC.

Lima, A. M. Q. S., Santos, L. R. A., Fonseca, L. G. A., & Souza, R. F. (2024). *Inovação na educação: aplicação da impressão 3D na química orgânica* (1ª ed). Editora UEPA. 10.31792/978-65-88106-76-1.

Lima, A.M., Ferreira, J.E., & De Souza, R.F. (2022). Química orgânica para alunos com deficiência visual: uma estratégia de aprendizagem combinando uso de modelos 3D e audiodescrição. *ACTIO: Docência em Ciências, 2* (7), 1-23. https://doi.org/10.3895/actio.v7n2.15387.

Meneses, F. M. G. & Nuñez, I. B. (2018). Erros e dificuldades de aprendizagem de estudantes do ensino médio na interpretação da reação química como um sistema complexo. *Ciência & Educação, 24*(1), 175-190. https://doi.org/10.1590/1516-731320180010012

Mertins, S., Silva, C. M., Amaral-Rosa, M. (2022). Ensino de química e a pergunta em sala de aula: Análise de narrativas por mônadas. In *Open Science Research III. Editora Científica Digital*, v.3. https://dx.doi.org/10.37885/220308391

Penny, M. et al. (2017). Three-dimensional printing of a scalable molecular model and orbital kit for organic chemistry teaching and learning. *Journal of chemical education, 9*(94), 1265-1271. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00953

Pinger, C. W., Geiger, M. K., & Spence, D. M. (2019). Applications of 3D-printing for improving chemistry education. *Journal of Chemical Education, 97*(1),112117. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00733

Roque, N.F., & Silva, J.L. (2008). A linguagem química e o ensino da Química Orgânica. *Química nova, 31*, 921-923. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000400034

Treagust, D. F., Duit, R., & Nieswandt, M. (2018). Sources of students' difficulties in learning Chemistry. *Educación Química, 11*(2), 228-235. https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2000.2.66458.

Tasker, R., & Dalton, R. (2006). Research into practice: visualisation of the molecular world using animations. *Chemistry Education Research and Practice, 7*(2), 141-159.

CC BY 4.0

Indagatio Didactica, vol. 17 (2), julho 2025 ISSN: 1647-3582
https://doi.org/10.34624/id.v17i2.39303

Watts, F.M., et al. (2020). What students write about when students write about mechanisms: analysis of features present in students' written descriptions of an organic reaction mechanism. *Chemistry Education Research and Practice, 21*(4), 1148-1172. https://doi.org/10.1039/C9RP00185A.

Wong, K.-C., Ip, I., & Ng, E. W. H. (2025). Enhancing stereochemistry education through inquiry-based learning and concrete molecular models. *Journal of Chemical Education, 102*(2), 583–592. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00829

Yin, R. (2015). *Estudo de caso: planejamento e métodos* (5ª ed). Bookman.

CC BY 4.0