Revista Virtual de Química

Educação

Rev. Virtual Quim. **2026**, *18(6)*, 936-949 – http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20260056

©2026 Sociedade Brasileira de Química

Educação Científica com Ambientes Imersivos: Ensino de Química Mediado por Realidade Virtual na Educação Básica

Science Education with Immersive Environments: Chemistry Teaching Mediated by Virtual Reality in Basic Education

Raphael S. Alvim,[a,*] Fernando H. de A. Moraes Neto,[a,b] Romero Tori[c]

[a] Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, CEP 13566-590, São Carlos-SP, Brasil

[b] Universidade Federal da Bahia, Instituto de Matemática e Estatística, Departamento de Estatística, CEP 40170-110, Salvador-BA, Brasil

[c] Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Computação, CEP 05508-010, São Paulo-SP, Brasil

***E-mail:** raphael.alvim@usp.br, raphael.alvim@educacao.mg.gov.br

Submissão: 12 de Janeiro de 2026 – **Aceite:** 6 de Agosto de 2026 – **Publicado online:** 18 de Agosto de 2026

Editor Associado Responsável: Bruno Silva Leite

Virtual Reality (VR) has emerged as a promising technological resource for science education, particularly in supporting the teaching of abstract concepts in chemistry. This study investigated the use of VR as an active learning strategy to approximate academic scientific research to basic education contexts. Immersive panoramic scenes were developed from images of chemical structures derived from computational chemistry research conducted by the first author. Using low-cost cardboard VR headsets, elementary school students were immersed in atomic- and molecular-scale environments, enabling the exploration of structural and spatial aspects of chemical systems. Based on a qualitative analysis of students' perceptions, the results suggest that the immersive experience supported the understanding of chemical structures and their spatial organization, contributing to engagement with abstract concepts in chemistry. The project also included a collaborative partnership with the Brazilian National Laboratory for Scientific Computing (LNCC), which provided contextualization of real research environments. The findings indicate that VR-based immersive environments represent a feasible, low-cost, and pedagogically promising approach for chemistry education in basic education.

Keywords: Virtual reality; chemistry education; science education; immersive learning environments; computational theoretical chemistry.

1. Introdução

A apresentação do ambiente de pesquisa científica aos estudantes da educação básica é preconizada pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC).[1] O interesse dos estudantes pela pesquisa científica constitui um elemento relevante para o desenvolvimento de competências na área de Ciências. Contudo, no âmbito científico experimental, muitas escolas públicas não dispõem de laboratório de ciências. É nesse contexto que a BNCC da Computação,[2] documento complementar à BNCC, também orienta às práticas pedagógicas relacionadas ao uso de recursos tecnológicos/computacionais. Sob essa perspectiva, para além das diretrizes curriculares, torna-se relevante compreender as perspectivas teóricas de aprendizagem que fundamentam o uso de tecnologias digitais no ensino.

De acordo com a teoria de aprendizagem da era digital, apoiada por George Siemens e Stephen Downes,[3] a teoria do conectivismo constitui a mais recente abordagem teórica de aprendizagem em rede. Ela busca compreender como as novas tecnologias de informação e comunicação (TIC) influenciam os processos de aprendizagem. Na área de Ensino de Química mediado por computadores (recursos tecnológicos), por exemplo, o computador se torna uma ferramenta tecnológica de grande importância, no que tange o processo de ensino-aprendizagem da pesquisa científica. Com o computador, é possível simular estruturas químicas e processos químicos na escala de átomos e moléculas, aproximando o estudante da escala de nanômetros. No âmbito computacional, o conceito de "proximidade" ou de "distância" no processo de ensino-aprendizagem é compreendido, sob a perspectiva teórica da Distância Transacional, como um fenômeno predominantemente psicológico e pedagógico, e não apenas geográfico ou tecnológico. Segundo Moore,[4] a separação física entre professor e estudante pode dar origem a um espaço psicológico e comunicacional, cuja magnitude depende do nível de diálogo, da estrutura do curso e da autonomia do estudante, e não exclusivamente da mediação tecnológica utilizada.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Nesse sentido, o conceito de distância transacional contribui para compreender como tecnologias digitais podem mediar a relação entre estudantes e conhecimento. No âmbito comunicacional, Tori *et al.* [5] destacam, por exemplo, os fundamentos e a importância do acesso a ambientes sintéticos, imersivos e de alta definição de realidades alternativas. Um ambiente sintético real tem o potencial de ser experimentado de forma interativa como a nossa realidade. Dessa forma, o conceito de realidade virtual (RV), como meio de comunicação, pode diminuir a distância transacional no contexto educacional. Contudo, os métodos, as técnicas e as tecnologias de cada RV precisam ser baseados nas características transacionais da comunicação aluno-professor, aluno-aluno e aluno-conteúdo. A RV é uma abordagem que permite gerar um ambiente digital de forma interativa como um ambiente físico tridimensional semelhante à realidade.[6,7] A experiência sensorial com RV se torna uma interessante prática pedagógica ampliada e enriquecida para os estudantes. A abordagem teórica da RV envolve diversas técnicas, que incluem a computação gráfica, visão computacional, interação humano-computador e psicologia cognitiva.[6,7] De acordo com esses conceitos, a gamificação também se apropria da RV, com o uso de elementos de jogos para criar experiências interativas e imersivas.[8]

No aspecto visual, a RV pode ser criada por meio de computação gráfica, que proporciona a imersão em ambientes virtuais sintéticos totalmente separados do espaço físico real.[6-8] Outra forma de criar ambientes imersivos é capturá-los diretamente do mundo real por meio de fotografias ou vídeos 360°, que não requer técnicas avançadas de renderização gráfica.[9,10] A visualização imersiva pode se dar por meio do dispositivo HMD (*Head-Mounted Display*), popularmente conhecido como "óculos" de RV. Esse dispositivo permite que o usuário se sinta imerso no ambiente virtual. Além de visualização tridimensional estereoscópica, o HMD detecta os movimentos da cabeça alterando a imagem de acordo com o ponto de vista, permitindo assim que o usuário mova sua cabeça para qualquer lado para visualizar o espaço virtual que o envolve.[11,12] Uma solução de baixo custo são os HMD construídos com papelão, que por meio da inserção de smartphones se tornam óculos de RV, conhecidos como *cardboard*.[13-15]

Do ponto de vista cognitivo, o uso de ambientes imersivos em RV deve considerar os limites da memória de trabalho e os processos de aprendizagem multimídia. Nesse contexto, modelos como o de Baddeley,[16] relacionados à memória de trabalho, e a teoria da aprendizagem multimídia de Mayer[17] oferecem importantes contribuições para o *design* pedagógico desses ambientes. Esses trabalhos indicam a necessidade de equilibrar estímulos visuais e auditivos, evitando a sobrecarga cognitiva e favorecendo o processamento eficiente das informações. Portanto, no Ensino de Química, especialmente em conteúdos abstratos e tridimensionais, como estruturas moleculares, o uso de RV deve privilegiar ambientes visualmente organizados e conceitualmente direcionados, de modo a potencializar a aprendizagem significativa.

Uma revisão sistemática recente sobre o uso do *Google Cardboard* em educação destaca que este dispositivo emergiu como uma solução de RV acessível e de fácil uso em contextos educacionais diversos.[13] O *cardboard* é compatível com dispositivos móveis e é capaz de motivar e facilitar experiências de aprendizagem imersivas em diferentes níveis e disciplinas. Relatos de aplicação na educação básica também evidenciam que tecnologias de RV e aumentada podem contribuir para uma aprendizagem interdisciplinar e mais atrativa, que permite aos estudantes explorar ambientes e situações antes inacessíveis.[14] Contudo, estudos discutem desafios associados a essas soluções, como limitações de conforto, qualidade visual e necessidade de adaptação pedagógica cuidadosa, ressaltando a importância de um desenho instrucional bem planejado. De qualquer forma, a RV aplicada à educação por meio de *cardboard* não necessita, necessariamente, de equipamentos caros e sofisticados.[15]

Ademais, o conceito de RV pode ser estendido para capturar e identificar elementos do mundo real, como marcadores ou características visuais,[18] que são usados para orientar os estudantes em uma cena panorâmica, por exemplo. Desse modo, a RV passa a permitir a integração de elementos virtuais, como os ambientes obtidos do mundo real, para criar experiências híbridas que misturam o real com o virtual de forma harmoniosa, também conhecida como XR (*Extended Reality ou Mixed Reality*).[19] Essa tecnologia apresenta amplo potencial para o processo de ensino-aprendizagem em contextos educacionais multidisciplinares,[12] principalmente baseado na abordagem STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics*).[20,21]

No contexto educacional contemporâneo, as Metodologias Ativas têm se destacado por promoverem maior protagonismo discente, significativa aprendizagem e integração entre teoria e prática.[22-24] Essas abordagens valorizam a participação ativa dos estudantes na construção do conhecimento, que favorecem estratégias que envolvem experimentação, resolução de problemas e uso de tecnologias educacionais. Nesse contexto, a RV surge como uma ferramenta tecnológica promissora, por possibilitar experiências imersivas capazes de reduzir a abstração associada a conteúdos complexos, como aqueles presentes no Ensino de Química.[12,25] Ao permitir a visualização tridimensional de estruturas e ambientes não diretamente observáveis, a RV se alinha às premissas das Metodologias

Ativas, que contribuem para o desenvolvimento de habilidades cognitivas, espaciais e interdisciplinares no ambiente educacional.[26,27]

De modo geral, as pesquisas sobre o uso de RV na educação concentram-se para ensino técnico e superior, provavelmente pela proximidade e facilidade de acesso ao público-alvo e pelo interesse dos pesquisadores, uma vez que tais investigações são, em grande parte, desenvolvidas em Universidades e Centros de Pesquisa. Na área tecnológica, Almeida e Miranda[28] mostram como a RV pode ser usada para o entendimento de complexas interfaces de materiais e compostos químicos na escala atômica. Em particular, a RV possibilita uma visualização imersiva em processos químicos de recuperação melhorada de petróleo, do interesse da indústria de petróleo e gás natural. Já no contexto educacional, particularmente no Ensino de Química, importantes trabalhos nacionais destacam o uso da RV e da realidade aumentada (RA), conceito ligado ao de RV com a diferença que o usuário, em vez de ser transportado a um ambiente virtual, interage com elementos virtuais misturados ao espaço físico ao seu redor, como poderosas ferramentas pedagógicas para a visualização de átomos e moléculas pelos estudantes.[29,30]

Diante do contexto científico-educacional, o objetivo central deste trabalho foi investigar o uso da RV como ferramenta pedagógica em uma metodologia ativa voltada particularmente ao Ensino de Química na Educação Básica a partir de estruturas químicas obtidas em pesquisas científicas. O intuito foi empregar ambientes imersivos baseados em estruturas químicas reais para auxiliar a compreensão espacial de conceitos químicos abstratos. Para isso, elementos geométricos são utilizados como suporte cognitivo para a visualização de estruturas químicas, em uma abordagem interdisciplinar alinhada à perspectiva STEAM. Essa característica pode contribuir para a redução das dificuldades associadas à abstração e à representação espacial no contexto da Educação Básica, além de aproximar conceitos visuais abordados em geometria e química molecular e contribuir para a redução da lacuna de pesquisas de uso de RV na Educação Básica. Dessa forma, destaca-se também a dimensão de divulgação científica da proposta, que se materializa na aproximação entre a Educação Básica e ambientes reais de pesquisa, por meio de parcerias institucionais que possibilitam aos estudantes o contato com infraestruturas e práticas científicas contemporâneas.

A partir desses pressupostos teóricos e educacionais, foi desenvolvida a proposta pedagógica descrita neste estudo. Nesse contexto, a proposta pedagógica desenvolvida neste trabalho envolve a utilização de ambientes imersivos em 360°, construídos a partir de estruturas químicas oriundas de pesquisas científicas, como forma de aproximar os estudantes da Educação Básica de práticas e representações típicas da investigação em Química. As imagens panorâmicas forneceram os modelos químicos e ambientes que fundamentam a proposta educacional apresentada neste artigo. Assim, a RV pode ser compreendida como um recurso que potencializa processos de transposição didática de conhecimentos científicos produzidos em ambiente de pesquisa de alto desempenho computacional para o contexto do Ensino de Química na Educação Básica. Ao aproximar resultados de pesquisas acadêmicas do ambiente escolar, o estudo buscou contribuir para a educação científica interdisciplinar (Química, Matemática e Computação), alinhada às diretrizes da BNCC e da BNCC da Computação na área de Ensino de Química mediado por tecnologias computacionais. Ademais, todo o conteúdo imersivo de RV foi gerado e aplicado em uma escola de Ensino Básico, que não dispõe de laboratório de ciências.

2. Metodologias Educacionais e Computacionais

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem exploratória, baseada na aplicação de uma proposta pedagógica mediada por RV no Ensino de Química. O estudo foi realizado com estudantes do 7º ano do Ensino Fundamental II de uma escola pública. Participaram da intervenção aproximadamente 20 estudantes, dos quais 19 responderam ao questionário aplicado ao final da atividade. O instrumento foi disponibilizado a todos os participantes com o objetivo de avaliar suas percepções sobre a experiência com RV no contexto do ensino de Química.

A proposta pedagógica foi estruturada com base em habilidades da BNCC e da BNCC da Computação para o 7º ano do Ensino Fundamental II. Foram consideradas as habilidades EF07MA21 (Geometria), EF07CI12 e EF07CI13 (Ciências da Natureza – efeito estufa), e EF07CO11 (impactos da tecnologia digital), utilizadas como referência para o planejamento das atividades e elaboração do instrumento de coleta de dados.

De modo geral, a proposta consistiu na utilização de imagens panorâmicas imersivas em 360°, construídas a partir de estruturas químicas obtidas em pesquisas científicas em Química Teórica Computacional, com o objetivo de possibilitar aos estudantes a identificação e interpretação de padrões estruturais relevantes no contexto químico. Esses padrões estão presentes em estruturas moleculares e de materiais previamente desenvolvidas e publicadas na literatura especializada pelo primeiro autor.[31–38] Tais estudos foram realizados no Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), com a utilização da infraestrutura do supercomputador Santos Dumont (SDumont),[39] um dos principais sistemas de computação de alto desempenho

em operação no Brasil. A partir dessas estruturas, foram elaboradas cenas panorâmicas imersivas utilizadas nas atividades pedagógicas. Adicionalmente, no âmbito da proposta, foram incorporadas ações de divulgação científica por meio da utilização de imagens panorâmicas do LNCC e do data center do SDumont, permitindo a contextualização dos ambientes reais de pesquisa junto aos estudantes da Educação Básica.

Para a construção dos ambientes imersivos, foram selecionadas duas estruturas químicas previamente publicadas em estudos de Química Teórica Computacional conduzidos pelo primeiro autor.[31-38] Essas estruturas foram escolhidas com base em sua relevância científica e potencial de visualização espacial, contemplando contextos distintos da Química contemporânea, como recursos naturais não renováveis e sustentabilidade. Ressalta-se, ainda, que os resultados desses estudos não são reproduzidos ou reinterpretados do ponto de vista químico, sendo utilizados exclusivamente como referência para a construção de cenários imersivos com finalidade educacional. Dessa forma, o foco do presente trabalho está na aplicação pedagógica dessas representações, com o objetivo de apoiar a visualização e a compreensão espacial de estruturas químicas no Ensino de Química.

A primeira estrutura refere-se a moléculas de asfalteno presentes no petróleo,[31-34] caracterizadas pela presença de anéis aromáticos com geometria predominantemente hexagonal (Figura 1a). A segunda estrutura corresponde a um sistema catalítico baseado em óxido de magnésio (MgO) suportado em prata (Ag), investigado em estudos de conversão de dióxido de carbono (CO_2),[35-38] com organização estrutural associada a padrões geométricos quadrangulares (Figura 1b). A seleção dessas estruturas permitiu explorar, no contexto educacional, diferentes padrões geométricos presentes em sistemas químicos reais, favorecendo a articulação entre visualização espacial e compreensão de conceitos químicos.

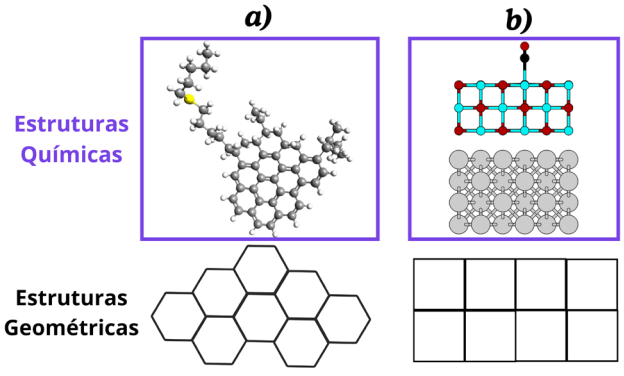


Figura 1. Estruturas químicas utilizadas na construção dos ambientes imersivos em realidade virtual: (a) molécula de asfalteno, adaptada da referência 31; (b) sistema MgO/Ag empregado em estudos de adsorção de CO, adaptado da referência 36

A imagens foram convertidas em formatos panorâmicos em 360° por meio do aplicativo *Photooxy*.[40] Posteriormente, as imagens imersivas foram hospedadas na plataforma *online Kuula*,[41] responsável pela geração de endereços eletrônicos compatíveis com a visualização em dispositivos de RV do tipo *cardboard*. De forma complementar, cenas panorâmicas do LNCC, onde está localizado o supercomputador SDumont, foram obtidas a partir do *Google Street View* com o auxílio da ferramenta *Street View Download 360*.[42,43] Para a inserção de conteúdos informativos interativos nas imagens panorâmicas, foi utilizada a plataforma Momento 360°,[44] em que todas as anotações foram baseadas em informações oficiais fornecidas pelo próprio LNCC. A disponibilização dos conteúdos foi facilitada por meio da geração de endereços eletrônicos encurtados e *QRCodes*, obtidos com a ferramenta *bit.ly*.[45]

As imagens panorâmicas do interior do laboratório de pesquisa e do supercomputador SDumont foram disponibilizadas ao projeto por meio de uma parceria estabelecida entre o autor principal e o LNCC, com registros em 360° do ambiente computacional.[39] O SDumont integra o Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho (SINAPAD) e é utilizado em simulações e modelagens computacionais em diversas áreas do conhecimento,[46] que incluem a Química Teórica Computacional, e também é a infraestrutura empregada pelo autor principal para a obtenção das estruturas químicas exploradas neste trabalho.

A proposta pedagógica foi aplicada a estudantes do 7º Ano do Ensino Fundamental II. A aplicação da proposta foi realizada em três etapas:

(i) Etapa de familiarização: consistiu em uma atividade inicial de imersão em RV por meio de um vídeo em 360° do Museu do *Louvre*, disponível no *YouTube*.[47] O conteúdo foi selecionado por apresentar ampla diversidade de padrões geométricos na arquitetura e nas obras expostas, conforme discutido por Launay em seu livro "A Fascinante História da Matemática".[48] Essa etapa ocorreu no dia 11 de outubro de 2024 e teve como objetivo preparar os estudantes para o uso dos óculos do tipo *cardboard* e para a visualização imersiva em ambientes virtuais.

(ii) Etapa de aplicação pedagógica: realizada durante a "Feira de Ciências, Matemática e Geografia" da escola, em 09 de novembro de 2024, no contexto da "Semana Nacional de Ciência e Tecnologia". Nessa ocasião, os estudantes atuaram como protagonistas na mediação de duas práticas imersivas em RV, organizadas em ambientes temáticos distintos: um relacionado a fontes não renováveis de energia, com a molécula de asfalteno, e outro associado à sustentabilidade, com a estrutura catalítica de MgO suportado em Ag para conversão de CO_2.

(iii) Etapa de contextualização e imersão: incluiu a exibição prévia de um vídeo explicativo em duas dimensões sobre as estruturas químicas, disponibilizado por meio da plataforma *YouTube* e acessível via *QRCode*, seguida da visualização imersiva das imagens panorâmicas com óculos *cardboard*.[49]

Após o evento, os estudantes responderam a um questionário de avaliação qualitativa da metodologia ativa baseada em RV aplicada ao Ensino de Química.[50] O instrumento continha 12 questões de múltipla escolha, abrangendo conteúdos de Matemática, Ciências da Natureza, Computação e RV, elaboradas com base nas habilidades previstas na BNCC e na BNCC da Computação para os anos finais do Ensino Fundamental. O questionário foi construído e disponibilizado por meio da plataforma *Google Forms*.[51] A análise dos dados foi conduzida de forma qualitativa e interpretativa, a partir da identificação de tendências nas respostas dos estudantes. Foram consideradas categorias como compreensão conceitual, percepção espacial, engajamento e interpretação da experiência imersiva, permitindo avaliar como os estudantes perceberam a utilização da RV no Ensino de Química. Ademais, cenas panorâmicas do LNCC e do supercomputador SDumont foram utilizadas como proposta de recurso complementar de contextualização científica no âmbito da proposta pedagógica. Essas imagens foram enriquecidas com anotações interativas sobre componentes essenciais de laboratórios computacionais, como *data centers*, sistemas de gases e painéis de controle, com o objetivo de ampliar a compreensão dos estudantes sobre a infraestrutura envolvida em pesquisas científicas e favorecer a contextualização da Química Teórica Computacional em ambientes reais de investigação.[52]

Toda a pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC) da Universidade de São Paulo (USP), sob o número de CAAE 80755824.6.0000.5390. O estudo também contou com a anuência formal da direção da escola participante. A participação dos estudantes ocorreu em conformidade com os procedimentos éticos vigentes da escola participante. Tais procedimentos incluem o consentimento informado dos responsáveis legais, previamente obtido no ato da matrícula, e o uso de imagens e dados educacionais para fins acadêmicos e científicos, que asseguram o anonimato e a não identificação dos estudantes participantes.

3. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação da proposta didática baseada em RV, com ênfase nas percepções dos estudantes e nas implicações pedagógicas observadas. A análise qualitativa das percepções dos estudantes sugere que a integração entre RV e a abordagem STEAM pode favorecer a compreensão espacial de estruturas químicas. Foi observado que a visualização imersiva contribuiu para estabelecer conexões entre diferentes escalas de representação, desde o nível molecular até o nível macroscópico, aspecto este que que é frequentemente apontado na literatura como um desafio no Ensino de Química. Esses resultados sugerem que o uso de ambientes virtuais baseados em modelos oriundos da Química Teórica Computacional pode atuar como elemento mediador no desenvolvimento da percepção geométrica aplicada à compreensão de estruturas químicas. Esses resultados estão alinhados a estudos que destacam o papel da visualização imersiva na redução da abstração em conteúdos científicos complexos.[9-12]

A utilização de um ambiente de RV baseado em vídeo 360° do Museu do *Louvre*,[47] em Paris, mostrou-se eficaz como estratégia inicial para introduzir os estudantes do 7º ano do Ensino Fundamental II à percepção de padrões geométricos em contextos reais (Figura 2). As percepções relatadas pelos estudantes e os registros da atividade sugerem que elementos arquitetônicos, como a pirâmide de vidro do Pátio Napoleão, bem como os padrões geométricos presentes nas galerias internas do museu, podem ter favorecido o reconhecimento visual de formas e estruturas geométricas. Esse resultado corrobora a perspectiva apresentada por Launay,[48] ao destacar o Museu do *Louvre* como um espaço privilegiado para a observação e compreensão da geometria aplicada em contextos históricos, artísticos e arquitetônicos.

Esse primeiro contato dos estudantes com os óculos do tipo *cardboard* também evidenciou um processo inicial de adaptação ao ambiente imersivo, no qual os estudantes demonstraram curiosidade e engajamento com a tecnologia (Figura 2). Foi observado que a familiarização com o modo de visualização em RV, a adequação do posicionamento do *smartphone* e a navegação pelo ambiente virtual ocorreram de forma progressiva, sem comprometer o interesse pela atividade. Esse momento inicial se tornou relevante para reduzir barreiras técnicas e cognitivas associadas ao uso da RV, que preparou os estudantes para etapas posteriores da proposta didática. Apesar dos resultados positivos, foram observados alguns desafios práticos durante a implementação da proposta, especialmente relacionados ao processo de adaptação dos estudantes ao uso dos dispositivos de realidade virtual. Em alguns casos, dificuldades iniciais na manipulação dos óculos *cardboard* e na estabilização da visualização foram identificadas, exigindo mediação constante por parte dos estudantes-mediadores e do professor. Ademais, aspectos como possíveis desconfortos visuais e limitações de infraestrutura escolar, como acesso

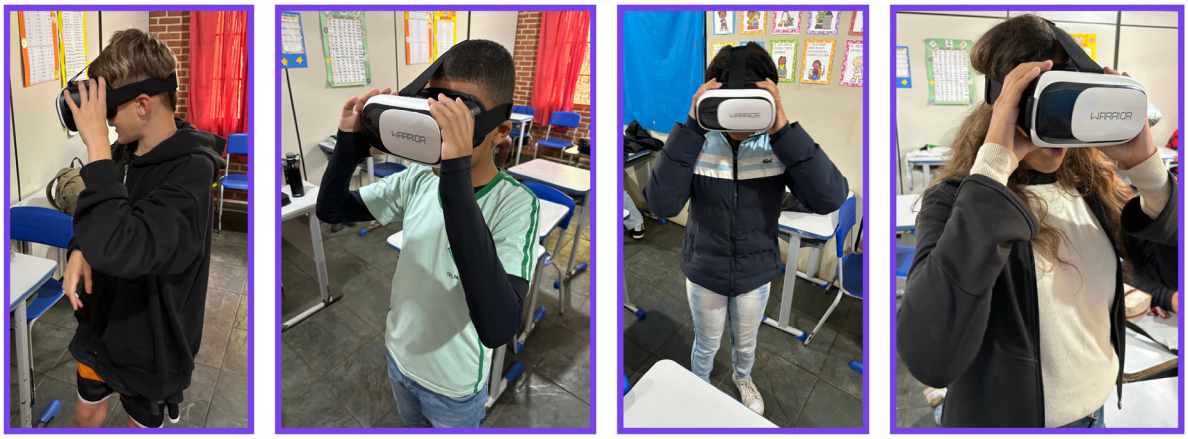


Figura 2. Registro do momento inicial de imersão em realidade virtual (RV), no qual estudantes do 7º Ano do Ensino Fundamental II utilizaram óculos do tipo *cardboard* para visualização de vídeo 360° do Museu do *Louvre*, em Paris, disponível no *YouTube*[47]

à internet e disponibilidade de dispositivos, configuram elementos que devem ser considerados na aplicação da RV em contextos educacionais reais.[12,13]

A aplicação da proposta didática em um evento científico escolar sugeriu indícios de protagonismo discente, observados na atuação dos estudantes como mediadores do conhecimento científico por meio da RV. Durante a atividade, os alunos do 7º Ano do Ensino Fundamental II atuaram como apresentadores e mediadores das experiências imersivas ao expor à comunidade escolar e ao público visitante os conceitos científicos e geométricos associados aos ambientes virtuais apresentados. Foi observado que a participação ativa dos estudantes favoreceu o desenvolvimento de habilidades comunicativas, senso de autoria e apropriação dos conteúdos abordados, aspectos centrais das Metodologias Ativas no Ensino de Química.

A utilização de recursos audiovisuais complementares, como a exibição inicial de um vídeo em duas dimensões (Figura 3), que contém movimentos das estruturas químicas de asfalteno e da conversão de CO_2, se mostrou relevante para a contextualização científica das experiências imersivas. Essa estratégia permitiu que os participantes da comunidade escolar pudessem estabelecer uma primeira compreensão visual das estruturas químicas e de suas relações com formas geométricas, antes da transição para a visualização tridimensional em RV. Foi observado também que essa articulação entre representações de duas e três dimensões contribuiu para a compreensão progressiva das estruturas químicas, além de ampliar o acesso aos conteúdos por meio de dispositivos móveis, que reforça o caráter inclusivo e multimodal da proposta.

A organização das experiências imersivas em dois ambientes conceituais contrastantes permitiu explorar, de forma comparativa, diferentes contextos de pesquisa científica em Química Teórica Computacional. Um dos ambientes abordou estruturas associadas a fontes não



Figura 3. Registro da exibição de vídeo em duas dimensões com estruturas químicas de asfalteno e da conversão de CO_2, utilizada para contextualização científica da atividade em realidade virtual (RV), com acesso ao conteúdo por *QRCode*

renováveis de energia, representadas pela molécula de asfalteno presente no petróleo, enquanto o outro enfatizou uma perspectiva de sustentabilidade, relacionada à estrutura de MgO sobre Ag aplicada à conversão de CO_2 (Figura 4). Os dados qualitativos e as percepções dos estudantes indicam que essa abordagem pode ter contribuído para discussões sobre aplicações químicas contemporâneas e suas implicações socioambientais, que amplia o entendimento dos participantes sobre o papel da Química em diferentes cenários tecnológicos e energéticos.

A associação entre a visualização imersiva em RV e o uso de modelos físicos de geometria molecular se mostrou relevante para o processo de identificação e compreensão das formas geométricas presentes nas estruturas químicas. A presença de modelos representativos (Figura 4), como o hexágono associado à molécula de asfalteno e o quadrado relacionado à estrutura utilizada na conversão de CO_2, auxiliou os participantes na transição entre representações abstratas e concretas. Ademais, a mediação realizada pelos estudantes durante a interação com os óculos do tipo *cardboard* contribuiu para a fluidez da experiência e para o fortalecimento do protagonismo discente, que evidencia o

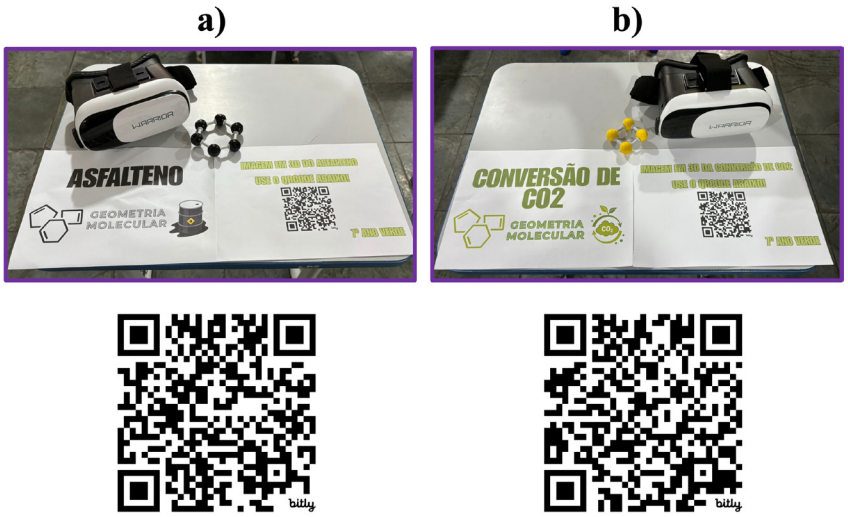


Figura 4. Ambientes conceituais contrastantes utilizados na experiência imersiva em realidade virtual (RV): (a) estrutura química associada a fontes não renováveis de energia, representada pela molécula de asfalteno, com acesso à visualização panorâmica em 360°; (b) estrutura associada a uma abordagem de sustentabilidade, baseada no sistema MgO/Ag aplicado à conversão de CO_2, também com acesso à visualização em 360°

protagonismo dos estudantes na condução e explicação das atividades científicas propostas (Figura 5).

Após a realização da atividade durante a "Feira de Ciências, Matemática e Geografia", os estudantes avaliaram qualitativamente a experiência pedagógica baseada em RV por meio de um questionário.[50] A análise teve como objetivo compreender as percepções dos estudantes sobre o uso da RV como metodologia ativa para o ensino de geometria aplicada à Química, especialmente a partir de estruturas químicas associadas a contextos de sustentabilidade. As respostas indicam como os estudantes interpretaram a integração entre Matemática, Química, Computação e tecnologias imersivas, que evidencia o caráter interdisciplinar da proposta. A análise das respostas foi conduzida de forma qualitativa e interpretativa, com base na identificação de tendências recorrentes nas percepções dos estudantes em relação aos eixos investigados (Química, Matemática, Computação e RV). Foram consideradas categorias analíticas emergentes, tais como engajamento, compreensão de estruturas químicas, percepção da imersão e articulação interdisciplinar, o que permitiu uma leitura mais sistematizada dos dados coletados. Embora não se trate de uma análise de conteúdo formal nos moldes de Bardin,[53] essa organização qualitativa possibilitou fortalecer a interpretação dos resultados, em consonância com estudos da área de ensino de ciências que utilizam abordagens exploratórias baseadas em percepções discentes.

A Figura 6 apresenta a análise das respostas consideradas mais representativas em cada eixo de conhecimento avaliado (Matemática, Ciências da Natureza, Computação e RV), com foco na articulação entre conceitos geométricos e estruturas químicas e no papel da imersão pedagógica proporcionada pela RV. A análise detalhada das respostas apresentadas na Figura 6 evidencia uma predominância de avaliações positivas em relação à experiência com realidade virtual, especialmente nas questões relacionadas à identificação de padrões geométricos (Q1-Q3) e à compreensão da organização estrutural das moléculas. Verifica-se que a maior parte dos estudantes indicou concordância total ou parcial nesses itens, o que sugere que a visualização imersiva pode ter contribuído para a percepção espacial de estruturas químicas. Por outro lado, algumas questões apresentaram maior variabilidade nas respostas, particularmente aquelas relacionadas à interpretação mais abstrata das estruturas e à articulação com contextos mais amplos (Q4-Q7), indicando que nem todos os estudantes atingiram o mesmo nível de compreensão. Esse resultado é coerente com o nível de escolarização dos participantes e reforça que a proposta atuou principalmente no reconhecimento visual e na familiarização inicial com conceitos estruturais, e não na formalização conceitual aprofundada. Ademais, as respostas associadas à experiência imersiva e ao engajamento (Q8-Q12) indicam uma percepção majoritariamente positiva quanto ao uso da RV como ferramenta pedagógica, ainda que com variações individuais. Esses resultados sugerem que a tecnologia contribuiu para o interesse e envolvimento dos estudantes, mas também evidenciam a necessidade de estratégias complementares para aprofundar a compreensão conceitual.

De modo geral, esses resultados sugerem que a maioria dos estudantes indicou compreender o propósito da proposta didática e foi capaz de reconhecer e interpretar o uso da geometria no contexto da Química, particularmente na visualização de estruturas moleculares. Embora os

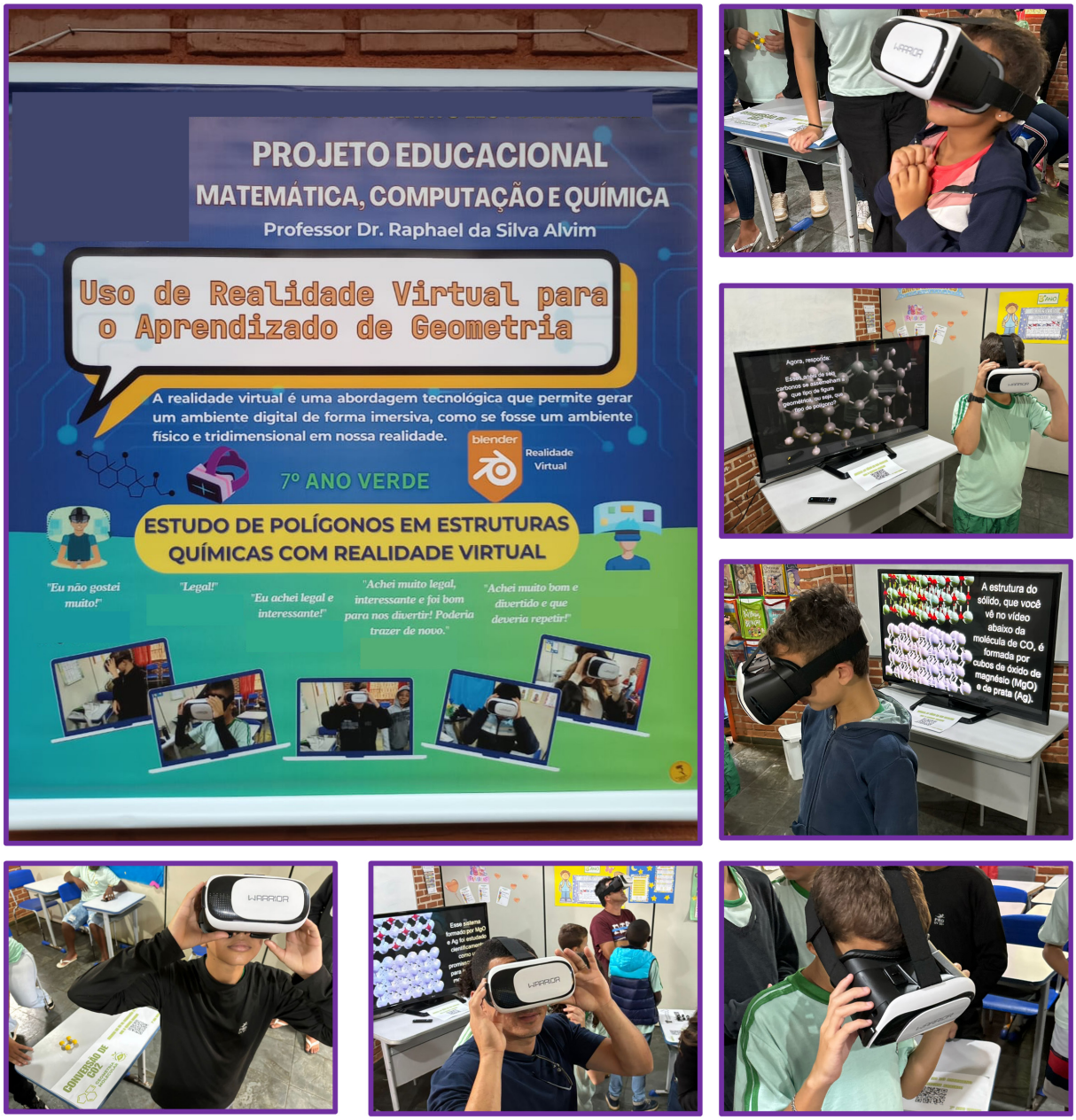


Figura 5. *Banner* do projeto e registros fotográficos da aplicação da proposta didática baseada em realidade virtual (RV) no Ensino Básico, que evidencia o protagonismo discente e a interação do público com as experiências imersivas durante evento científico escolar

conceitos de sustentabilidade tenham sido explorados de forma introdutória, seu uso como pano de fundo científico contribuiu para tornar a experiência imersiva mais desafiadora e cognitivamente promissora. Ademais, os resultados relacionados à Computação e à RV evidenciam a relevância das tecnologias digitais nos processos de ensino-aprendizagem, uma vez que os estudantes demonstraram compreender o papel da imersão em RV mesmo na ausência de elementos de interatividade direta. Portanto, considerando o nível de escolarização dos estudantes (7º ano do Ensino Fundamental II), a abordagem adotada neste estudo não teve como objetivo a formalização de conceitos avançados de geometria molecular, mas sim a introdução de aspectos visuais e espaciais associados às estruturas químicas. Dessa forma, buscou-se promover o reconhecimento de padrões estruturais e relações geométricas de maneira compatível com o processo inicial de alfabetização científica, em consonância com as habilidades previstas na BNCC. Esses achados estão alinhados a estudos que destacam o papel da visualização imersiva na redução da abstração em conteúdos científicos complexos.[9-12]

Como complemento à proposta pedagógica, foram desenvolvidas cenas panorâmicas do LNCC e do supercomputador SDumont, previstas para utilização em etapas futuras do projeto. Esse complemento ampliou o escopo formativo da experiência em RV, como uma

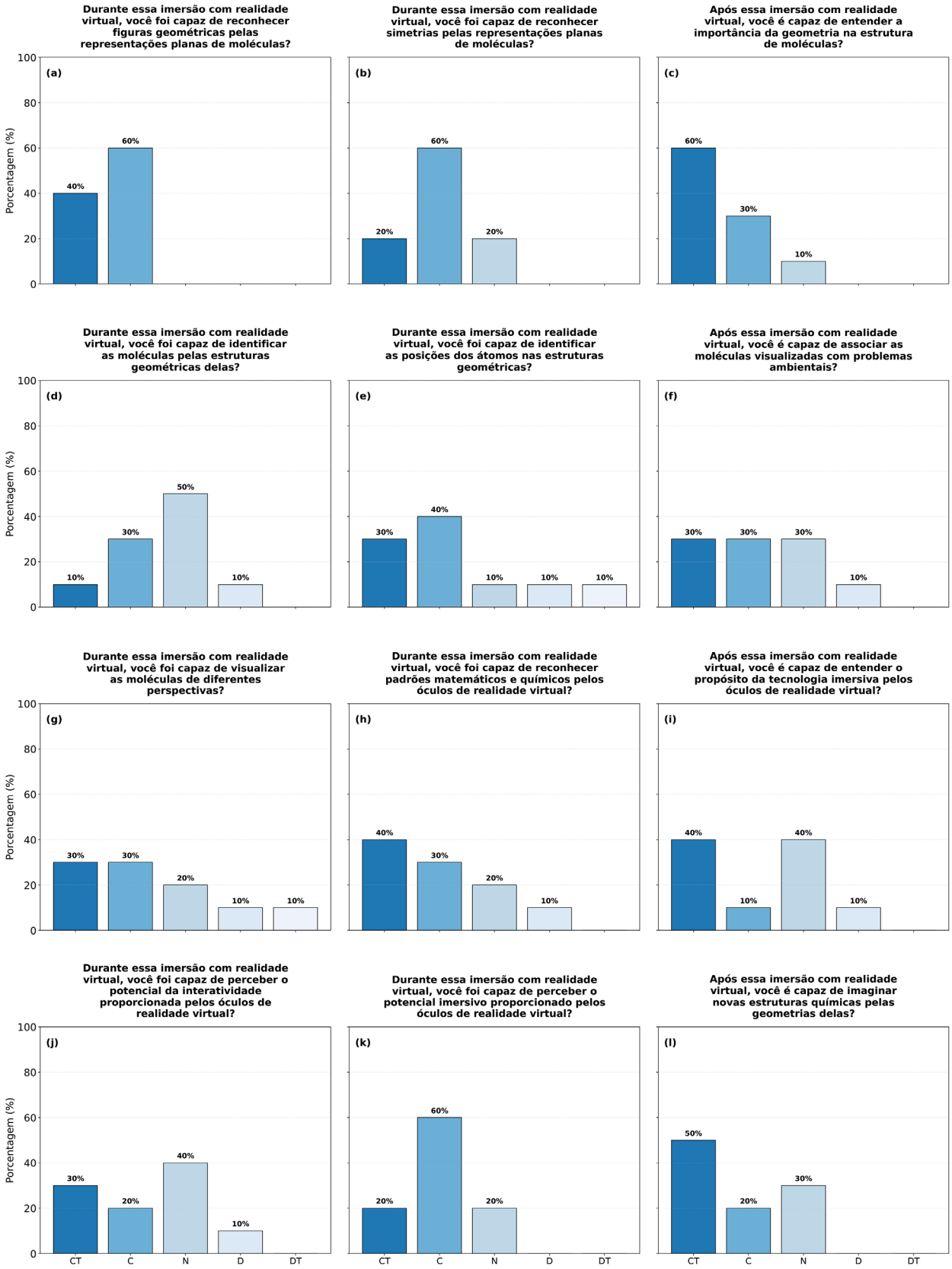


Figura 6. Análise qualitativa das respostas dos estudantes ao questionário aplicado após a atividade, com identificação explícita de cada questão analisada: (a) Q1, (b) Q2, (c) Q3, (d) Q4, (e) Q5, (f) Q6, (g) Q7, (h) Q8, (i) Q9, (j) Q10, (k) Q11 e (l) Q12. As categorias de resposta foram abreviadas nos gráficos como CT = concordo totalmente; C = concordo; N = não concordo nem discordo; D = discordo; DT = discordo totalmente. As questões foram elaboradas com base nas habilidades previstas na BNCC e na BNCC da Computação, e os resultados refletem as percepções dos estudantes sobre o uso da realidade virtual (RV) no Ensino de Química. O questionário completo encontra-se disponível na referência 50

possibilidade de aproximar estudantes de ambientes reais de pesquisa em Química Teórica Computacional (Figura 7). A inserção de anotações interativas nas imagens imersivas favoreceu uma compreensão mais contextualizada da infraestrutura científica necessária para estudos avançados em Química, que permitiu aos estudantes reconhecerem a complexidade tecnológica envolvida nesse tipo de investigação. Elementos como o data center, sistemas de suprimento de gases e painéis de controle foram utilizados como âncoras conceituais para discutir o papel da computação de alto desempenho na produção do conhecimento científico. A disponibilização das cenas por meio de *QRCode* (Figura 8) estimulou a exploração autônoma e reforçou o caráter ativo da proposta pedagógica, com uma importante contribuição para a articulação entre Química, Computação e tecnologias digitais no processo de ensino-aprendizagem.

As cenas panorâmicas do LNCC e do supercomputador SDumont não foram exploradas durante a "Feira de Ciências, Matemática e Geografia" da escola, pois foram reservadas para etapas futuras do projeto. A intenção é incorporar essas experiências imersivas em atividades específicas da área de Computação, bem como articulá-las a uma visita presencial às instalações do LNCC, atualmente em fase de planejamento. Essa articulação entre a vivência virtual e o contato direto com o ambiente real de pesquisa tende a potencializar a compreensão dos estudantes sobre a infraestrutura científica e o papel da computação de alto desempenho na química contemporânea.

De modo geral, a proposta possibilitou aos estudantes o exercício do protagonismo científico ao atuarem como mediadores do conhecimento durante a "Feira de Ciências, Matemática e Geografia", em consonância com os princípios das metodologias ativas e com as diretrizes da BNCC.[1,2,22-24] A imersão em ambientes de RV, baseados em cenas panorâmicas de estruturas químicas oriundas de pesquisas científicas em Química Teórica Computacional, favoreceu o contato dos estudantes com práticas, linguagens e contextos próprios do fazer científico, que se alinham a abordagens construtivistas e conectivistas da aprendizagem.[3,4,12] Nesse



Figura 7. Cenas panorâmicas imersivas do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) (imagem superior) e do *data center* do supercomputador Santos Dumont (SDumont) (imagem inferior), localizados em Petrópolis–RJ. As imagens foram enriquecidas com anotações informativas interativas, que destacam elementos estruturais e operacionais do ambiente de pesquisa, como infraestrutura computacional, sistemas de suporte e componentes do data center, permitindo contextualizar o papel da computação de alto desempenho em pesquisas em Química Teórica Computacional



Figura 8. *QRCode* disponibilizado aos estudantes para acesso às cenas panorâmicas imersivas do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) e do *data center* do supercomputador Santos Dumont (SDumont), utilizadas como recurso pedagógico complementar na atividade em realidade virtual (RV). O endereço eletrônico correspondente pode ser encontrado na referência 39

sentido, o domínio dos recursos tecnológicos e pedagógicos envolvidos no projeto amplia as possibilidades de os estudantes produzirem, de forma autônoma, experiências imersivas aplicáveis a diferentes áreas do conhecimento e a contextos do cotidiano.[21-23]

No campo específico do Ensino de Química, as imagens panorâmicas se mostraram versáteis, que permitiu a exploração de estruturas químicas complexas, como cristais, polímeros e materiais nanoestruturados, bem como a representação de transformações químicas em diferentes estágios de uma reação. Essas visualizações contribuem para discussões conceituais sobre conformações moleculares, interações intermoleculares e propriedades estruturais, o que o papel da Geometria como elemento integrador entre Matemática e Química no processo de ensino-aprendizagem.[12,20,25] Estudos prévios indicam que ambientes virtuais imersivos favorecem a aprendizagem de conteúdos espaciais e tridimensionais, ao reduzir a carga cognitiva associada à abstração e ampliar o engajamento discente.[9-11,12]

Ademais, o trabalho promoveu um estreitamento significativo entre o ambiente acadêmico e a Educação Básica, tanto pela transposição didática de resultados científicos para o contexto escolar quanto pela cooperação estabelecida com o LNCC. A criação de cenas panorâmicas e a disponibilização de dispositivos de RV configuram um legado pedagógico relevante, ao favorecer o engajamento discente e estimular práticas investigativas em Química, Geometria, tecnologia e outras áreas do conhecimento.[14,15] Portanto, a proposta consolida um procedimento tecnológico alinhado à abordagem STEAM, que integra Ciência, Matemática e Computação por meio de metodologias ativas mediadas pela RV.[21,23,24]

Por fim, os resultados evidenciam que a construção e a utilização de imagens imersivas em 360° constituem uma alternativa pedagógica viável, eficiente e de baixo custo para a implementação de metodologias ativas com RV na Educação Básica, especialmente quando associadas a soluções acessíveis como o *Cardboard*.[13,14,25] Os resultados reforçam o uso da tecnologia com RV como integradora da visualização, tecnologia e aprendizagem científica também na Educação Básica, resultados estes que corroboram com a literatura especializada.[5-7,12] Contudo, é importante reconhecer as limitações do presente estudo. Os resultados obtidos são baseados em uma avaliação qualitativa das percepções e experiências dos estudantes, pois não foram empregados instrumentos específicos para mensuração de aprendizagem conceitual ou de desenvolvimento cognitivo. Ademais, aspectos como o conforto físico e visual no uso dos dispositivos de RV demandam atenção, uma vez que podem influenciar a duração e a qualidade da experiência imersiva.[11,25] Portanto, os resultados devem ser interpretados como indicativos do potencial pedagógico da RV no Ensino de Química, e não como evidências conclusivas de ganhos cognitivos mensuráveis. Ainda assim, os resultados reforçam a RV como uma tecnologia capaz de integrar visualização, recursos digitais e aprendizagem científica, que podem ampliar as possibilidades didáticas no contexto da Educação Básica. Esses achados corroboram a literatura sobre o uso de RV no ensino de ciências, que aponta o potencial dessas tecnologias para ampliar o engajamento e favorecer a compreensão de conteúdos espaciais e tridimensionais.[9-12]

4. Conclusão

A realidade virtual (RV) constitui uma tecnologia intrinsecamente multidisciplinar, ao articular conhecimentos de Química, Matemática, Computação e Educação para a criação de experiências digitais imersivas capazes de ampliar a compreensão de fenômenos complexos. No contexto educacional, este trabalho evidencia que a RV não deve ser compreendida apenas como um recurso tecnológico inovador, mas como uma estratégia pedagógica capaz de aproximar os estudantes da Educação Básica das práticas, linguagens e ambientes característicos da pesquisa científica contemporânea. A partir da integração de conceitos entre Química e Geometria, mediada por cenas panorâmicas imersivas de estruturas moleculares oriundas de pesquisas em Química Teórica Computacional, foi possível promover experiências de aprendizagem que favoreceram a visualização espacial, a contextualização conceitual e o protagonismo dos estudantes. Os resultados indicam que a metodologia ativa baseada em RV contribuiu para tornar o ensino de Ciências mais significativo, ao permitir que os estudantes reconhecessem a aplicação da Geometria em estruturas químicas e compreendessem a ciência como um processo dinâmico e investigativo.

Na visão dos autores, um dos principais aportes deste trabalho reside no fortalecimento da aproximação entre a Educação Básica, a universidade e centros de pesquisa, especialmente por meio da cooperação estabelecida com o

Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) e com o supercomputador Santos Dumont (SDumont). A utilização de ambientes reais de pesquisa científica como objetos pedagógicos imersivos representa uma estratégia potente de divulgação científica, capaz de democratizar o acesso a infraestruturas e tecnologias que, tradicionalmente, permanecem distantes da realidade escolar. Essa aproximação contribui não apenas para a formação científica dos estudantes, mas também para a valorização social da ciência e da pesquisa pública. Ademais, a proposta apresentada demonstra que a implementação de metodologias ativas com RV na Educação Básica pode ser viável mesmo em contextos de recursos limitados, desde que apoiada em soluções de baixo custo e em um planejamento pedagógico consistente.

O procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho possibilitou a configuração de um modelo replicável, passível de adaptação a diferentes conteúdos, níveis de ensino e áreas do conhecimento, em consonância com a abordagem STEAM e com as diretrizes curriculares nacionais. No entanto, é fundamental ressaltar que os resultados apresentados possuem caráter exploratório, com fundamentação na análise das percepções dos estudantes e no engajamento observado durante as atividades. Portanto, os impactos sobre a aprendizagem conceitual e o desenvolvimento cognitivo não foram diretamente mensurados, o que aponta para a necessidade de estudos futuros que empreguem instrumentos específicos de avaliação e delineamentos metodológicos mais robustos. De qualquer forma, a abordagem apresentada abre caminhos promissores para o uso sistemático da realidade virtual no ensino de Geometria Molecular, especialmente em conteúdos que exigem elevada capacidade de visualização espacial, como estruturas tridimensionais, simetrias moleculares, hibridização, conformações e interações intermoleculares. Ao possibilitar o contato precoce dos estudantes da Educação Básica com representações típicas da pesquisa em Química, a proposta favorece uma continuidade formativa entre os diferentes níveis de ensino, que aproxima o currículo escolar de práticas consolidadas no ensino superior e na pesquisa científica.

Como perspectivas futuras, é pretendido ampliar a criação de cenas panorâmicas imersivas a partir de simulações computacionais de outros sistemas químicos descritos na literatura científica, bem como de laboratórios de pesquisa e ambientes educacionais diversos. Essa expansão poderá possibilitar que estudantes da Educação Básica tenham acesso virtual a espaços científicos, culturais e tecnológicos fora de sua realidade cotidiana, que tem o potencial de transformar museus, cidades, laboratórios ou estruturas moleculares em ambientes de aprendizagem. Portanto, é defendido que o uso pedagógico da RV possui potencial para redefinir os limites da sala de aula e consolidar novas formas de ensinar e aprender ciências na Educação Básica.

Agradecimentos

O autor R.S.A. agradece à direção da escola, por possibilitar a execução do projeto. O autor R.S.A. agradece, também, aos professores, às supervisoras, secretária escolar e aos demais funcionários da escola, pela imprescindível e necessária ajuda durante a execução do projeto. Em especial, o autor R.S.A. agradece aos estudantes da turma do 7º Ano, que se comprometeram e se engajaram na realização do projeto. O autor R.S.A. agradece, também, a divulgadora científica Anmily Paula Martins, do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), que forneceu a bela imagem em 360º do interior do Supercomputador SDumont, sob a anuência do professor Antonio Tadeu Azevedo Gomes, coordenador do Comitê Gestor do Supercomputador SDumont. Um agradecimento especial ao Instituto de Ciências Matemáticas e da Computação da Universidade de São Paulo (ICMC-UPS), à Pós-Graduação em Computação Aplicada à Educação e Tecnologias Educacionais (CAE), que por meio de suas disciplinas inovadoras, em especial "Ambientes Imersivos na Educação (AIE)", proporcionaram o embasamento teórico imprescindível para o desenvolvimento desse trabalho.

Referências Bibliográficas

1. Brasil.; Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Disponível em: <https://www.gov.br/mec/pt-br/cne/base-nacional-comum-curricular-bncc>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
2. Brasil.; Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular da Computação. Disponível em: <https://www.gov.br/mec/pt-br/escolas-conectadas/BNCCComputaoCompletodiagramado.pdf.> Acesso em: 3 janeiro 2026.
3. Siemens, G. *Conectivismo: uma Teoria para a Era Digital*. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/66317606/Conectivismo-uma-Teoria-Para-a-Era-Digital>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
4. Moore, M. G.; Teoria da Distância Transacional. *Revista Brasileira de Aprendizagem Aberta e a Distância* **2002**, *1*, 1. [Crossref]
5. Tori, R.; Hounsell, M. S.; Kirner, C.; Em *Introdução à Realidade Virtual e Aumentada*; Tori, R.; Hounsell, M. S., Eds.; Editora SBC: Porto Alegre, 2018, cap. 1.
6. Burdea, G. C.; Coiffet, P.; *Virtual Reality Technology*, 3a. ed., Wiley-IEEE Press: New York, 2024.
7. Sherman, W. R.; Craig, A. B.; *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*; 2a. ed., Morgan Kaufmann: Massachusetts, 2018.

8. Carolei, P.; Tori, R.; Gamificação Aumentada: Explorando a Realidade Aumentada em Atividades Lúdicas de Aprendizagem. *TECCOGS: Revista Digital De Tecnologias Cognitivas* **2014**, *9*, 14. [Crossref]
9. Slater, M.; Wilbur, S.; A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* **1997**, *6*, 603. [Crossref]
10. Steuer, J.; Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication* **1992**, *42*, 73. [Crossref]
11. Slater, M.; Sanchez-Vives, M. V.; Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI* **2016**, *3*, 74. [Crossref]
12. Radianti, J.; Majchrzak, T. A.; Fromm, J.; Wohlgenannt, I.; A Systematic Review of Immersive Virtual Reality Applications for Higher Education: design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education* **2020**, *147*, 103778. [Crossref]
13. Wang, Z.; Chan, M.-T.; A Systematic Review of Google Cardboard Used in Education. *Computers & Education: X Reality* **2024**, *4*, 100046. [Crossref]
14. Lima Junior, H. G.; Dantas, R. F. B.; Andrade, M. V. V.; O Uso de Aplicações de Realidade Virtual e Realidade Aumentada Como Ferramentas Pedagógicas na Educação Básica. *RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar* **2021**, *2*, e29676. [Crossref]
15. Pedrosa, S. M. P. A.; Zappala-Guimarães, M. A.; Realidade Virtual e Realidade Aumentada: refletindo sobre usos e benefícios na educação. *Revista Educação e Cultura Contemporânea* **2019**, *16*, 123. [Crossref]
16. Mayer, R. E.; *Multimedia Learning*, 2a. ed., Cambridge University Press: New York, 2009.
17. Baddeley, A. D.; Working Memory. *Science* **1992**, *255*, 556. [Crossref]
18. Azuma, R. T.; A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* **1997**, *6*, 355. [Crossref]
19. Milgram, P.; Kishino, F.; A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems* **1994**, *E77-D*, 1321. [Crossref]
20. Ibáñez, M.-B.; Delgado-Kloos, C.; Augmented Reality for STEM Learning: a systematic review. *Computers & Education* **2018**, *123*, 109. [Crossref]
21. Quigley, C. F.; Herro, D.; Finding the Joy in the Unknown: Implementation of STEAM teaching practices in middle school science and math classrooms. *Journal of Science Education and Technology* **2016**, *25*, 410. [Crossref]
22. Bonwell, C. C.; Eison, J. A.; *Active Learning: Creating Excitement in the Classroom*. ASHE-ERIC Higher Education Report: Washington, 1991.
23. Prince, M.; Does Active Learning Work? A Review of the Research. *The Journal for Engineering Education* **2004**, *93*, 223. [Crossref]
24. Moran, J. M.; Em *Metodologias Ativas para uma Educação Inovadora: Uma Abordagem Teórico-Prática;* Bacich, L.; Moran, J. M., Eds.; Penso: Porto Alegre, 2018, cap. 1.
25. Coban, M.; Bolat, Y. I.; Goksu, I.; The Potential of Immersive Virtual Reality to Enhance Learning: a meta-analysis. *Educational Psychology Review* **2022**, *36*, 100452. [Crossref]
26. Gilbert, J. K.; *Visualization in Science Education*. Springer: Dordrecht, 2005.
27. Wu, H. K.; Shah, P.; Exploring Visuospatial Thinking in Chemistry Learning. *Science Education* **2004**, *88*, 465. [Crossref]
28. Almeida, J. M.; Miranda, C. R.; *Resumos da Offshore Technology Conference,* Rio de Janeiro, Brazil, 2019. [Link]
29. Grando, J. W.; Cleophas, M. G.; Aprendizagem Móvel no Ensino de Química: apontamentos sobre realidade aumentada. *Química Nova na Escola* **2021**, *43*, 148. [Crossref]
30. Patrício, P. R.; Reis, W. F.; Castro, R. A.; Andrade, G. M. P. C.; Realidade Aumentada no Ensino de Química Orgânica: uma abordagem imersiva e interativa para o ensino de isomeria plana e espacial. *Revista Virtual de Química* **2025**, *17*, 3. [Crossref]
31. Alvim, R. S.; Lima, F. C. D. A.; Sánchez, V. M.; Headen, T. F.; Boek, E. S.; Miranda, C. R.; Adsorption of Asphaltenes on the Calcite (10.4) Surface by First-Principles Calculations. *RSC Advances* **2016**, *6*, 95328. [Crossref]
32. Lima, F. C. D. A.; Alvim, R. S.; Miranda, C. R.; From Single Asphaltenes and Resins to Nanoaggregates: a computational study. *Energy & Fuels* **2017**, *31*, 11743. [Crossref]
33. Alvim, R. S.; Miranda, C. R.; First-Principles Calculations of Carboxylic Acid Adsorption on Carbonate Surfaces: Chain Size and Aqueous Interface Effects. *Applied Surface Science* **2022**, *592*, 153216. [Crossref]
34. Alvim, R. S.; Material Surfaces and Interfaces: characterization, molecular adsorption and heterogeneous catalysis by computational simulation. *Revista Virtual de Química* **2023**, *15*, 262. [Crossref]
35. Alvim, R. S.; Vaiss, V. S.; Leitão, A. A.; Borges Jr., I.; Theoretical Chemistry at the Service of the Chemical Defense: degradation of nerve agents in Magnesium Oxide and Hydroxide Surface. *Revista Virtual de Química* **2014**, *6*, 687. [Crossref]
36. Alvim, R. S.; Borges Jr., I.; Alves, R. M. B.; Capaz, R. B.; Leitão, A. A.; CO Adsorption on MgO Thin-Films: Formation and Interaction of Surface Charged Defects. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2023**, *25*, 28982. [Crossref]
37. Marcos, F. C. F.; Alvim, R. S.; Lin, L.; Betancourt, L. E.; Petrolini, D. D.; Senanayake, S. D.; Alves, R. M. B.; Assaf, J. M.; Rodriguez, J. A.; Giudici, R.; Assaf, E. M.; The Role of Copper Crystallization and Segregation toward Enhanced Methanol Synthesis via CO_2 Hydrogenation over $CuZrO_2$ Catalysts: A Combined Experimental and Computational Study. *Chemical Engineering Journal* **2023**, *452*, 139519. [Crossref]
38. Alvim, R. S.; Bresciani, A. E.; Alves, R. M. B.; Formic Acid Stability in Different Solvents by DFT Calculations. *Journal of Molecular Modeling* **2024**, *30*, 67. [Crossref]

39. SDumont. Sistema Brasileiro de Computação Petaflópica; Disponível em: <https://sdumont.lncc.br/index.php>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
40. Photooxy; Disponível em: <https://photooxy.com/>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
41. Kuula; Disponível em: <https://kuula.co/>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
42. Google Maps; Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
43. Street View Download 360; Disponível em: <https://svd360.istreetview.com/>. Acesso em: 3 jan. 2026.
44. Momento 360; Disponível em: <https://www.momento360.com/>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
45. Bitly; Disponível em: <https://bitly.com/>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
46. Pesquisa Fapesp; O que são os supercomputadores? Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=PujRmiFHiOY>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
47. Rolê 360 | Nômades Digitais em Realidade Virtual; Museu do Louvre em Realidade Virtual | O Maior Museu do Mundo. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=g4N6pDHnz6A>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
48. Launay, M.; *A Fascinante História da Matemática: Da Pré-História aos Dias de Hoje*, 4a. ed., Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2022.
49. Alvim, R. S.; Estudo de Polígonos em Estruturas Químicas com Realidade Virtual. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5o08f8bhITY>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
50. Alvim, R. S.; Questionário elaborado com o intuito de avaliar qualitativamente a metodologia ativa em RV apresentada neste trabalho para o ensino de geometria e de forma interdisciplinar com química. Disponível em: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf9bLHV7Rz8EpyzND28B3l0QX7r5ofM4wi6VUH4hi4Fm_mFHQ/viewform>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
51. Google Forms; Disponível em: <https://docs.google.com/forms/u/0/>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
52. Data Center SDumont; Cenas panorâmicas do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) e do data center do Supercomputador Santos Dumont. Disponível em: <https://bit.ly/SDumontLNCC>. Acesso em: 3 janeiro 2026.
53. Bardin, L.; *Análise de Conteúdo*; Edições 70: Lisboa, 2011.