



## MODELAGEM TRIDIMENSIONAL: REFLEXÕES DE FUTUROS PROFESSORES DE QUÍMICA PARA O ENSINO E APRENDIZAGEM DA INTERAÇÃO ENZIMA-SUBSTRATO

*Tree-dimensional modeling: reflections of future chemistry teachers for teaching and learning of enzyme-substrate interaction*

**Joyce Fernandes Almeida** [joycebioquimica@gmail.com]

*Programa de Pós-Graduação em Educação (PPGE)*

*Universidade Federal de Alfenas, Campus Sede, Alfenas, Minas Gerais, Brasil*

**Keila Bossolani Kiill** [keilaunifal@gmail.com]

*Instituto de Química e Programa de Pós-Graduação em Educação (PPGE)*

*Universidade Federal de Alfenas, Campus Sede, Alfenas, Minas Gerais, Brasil*

### Resumo

No Ensino de Ciências, a participação de estudantes em atividades de modelagem tridimensional tem sido um tema ainda pouco explorado em termos de pesquisa. Neste contexto, a presente investigação teve como objetivo apresentar e discutir as reflexões de futuros professores de química sobre o processo de modelagem tridimensional como estratégia de ensino e aprendizagem da interação enzima-substrato. Para isso, quinze estudantes de uma turma do 7º período do curso de Licenciatura em Química realizaram uma sequência de etapas da modelagem científica propostas na literatura e adaptadas para a modelagem tridimensional. As informações foram geradas por meio de desenhos, entrevistas, relatos pessoais e diário de pesquisa, seguido da transcrição e análise temática. Os resultados apontam que a participação dos estudantes nas atividades de modelagem tridimensional possibilitou: (i) indícios de aprendizagem significativa da interação enzima-substrato; e (ii) contribuições para a formação docente. Isso no sentido de possibilitar a reflexão sobre as implicações do uso de modelos 3D impressos em suas futuras práticas de ensino. Os apontamentos deste estudo sugerem que o processo de modelagem tridimensional apresentado pode orientar professores e pesquisadores em atividades práticas de construção de conhecimento em sala de aula, sobretudo, podem contribuir para as discussões a respeito da participação de estudantes em atividades de modelagem tridimensional.

**Palavras-Chave:** ensino de química; impressão tridimensional; estratégias de aprendizagem.

### Abstract

The students' participation in tree-dimensional modeling activities in Science Education has been a topic not yet explored in researches. In this context, the research aimed to present and discuss the reflections of future chemistry teachers' about the three-dimensional modeling process as a strategy for teaching and learning the enzyme-substrate interaction. For this, fifteen students of the 7<sup>o</sup> period of graduating in Chemistry carried out a sequence of scientific modeling steps proposed in the literature and adapted for tree-dimensional modeling. The information was generated through of drawings, interviews, personal reports and research diary, followed by transcription and thematic analysis. The results show that students' participation in tree-dimensional modeling activities made it possible to: (i) evidence a significant learning on the enzyme-substrate interaction; and (ii) contributions to teacher training. This study was done in order to enable reflection on the implications of the use of 3D printed models design in their future teaching practices. The study notes suggest that the tree-dimensional modeling process presented can guide teachers and researchers in practical activities to build knowledge in the classroom, above all, they can contribute to the discussions about the students participation in modeling activities.

**Keywords:** chemical education; three-dimensional printing; learning strategies.

## INTRODUÇÃO

A modelagem escolar ainda é um tema pouco explorado em investigações científicas em geral, sobretudo a modelagem com enfoque tridimensional. Para muitos autores novas pesquisas são fundamentais, pois o processo de modelagem escolar possibilita a criação de modelos científicos que podem auxiliar a aprendizagem de fenômenos ou conceitos complexos e abstratos (Gilbert, 2005; Ornek, 2008; Gilbert & Treagust, 2009; Justi, 2010; Taber, 2013; Pérez, Galindo, & Galli, 2018).

Nas diferentes abordagens na literatura sobre o processo de modelagem, o termo modelagem escolar é uma das concepções empregadas em estudos na área de Ensino de Ciências. Os autores Pérez *et al.* (2018, p. 2102-5, tradução nossa) definem a modelagem escolar como sendo um processo que possibilita a explicação e previsão de fenômenos, no qual os estudantes elaboram e reelaboram seus próprios modelos. Nesta abordagem:

*“Os alunos confrontam um fenômeno para o qual devem oferecer uma explicação. Este modelo inicial dos alunos (que inclui suas próprias concepções alternativas) será revisado e reelaborado para regular seu poder explicativo durante a sequência didática. Isso implica que os diferentes modelos construídos se ajustam gradualmente para responder ao fenômeno apresentado e podem ser parciais ou incompletos até alcançar uma concepção científica”.*

Em se tratando do processo de modelagem tridimensional, não há um consenso sobre suas etapas. No entanto, notamos que esse processo está associado às etapas da modelagem científica (Justi, 2010), as quais são, fundamentalmente: (i) criação, (ii) expressão, (iii) teste, e (iv) avaliação. A interface entre a modelagem tridimensional e a modelagem científica é a compreensão do processo dinâmico e não linear<sup>1</sup> para criação de modelos por meio do uso da impressora 3D (Fourches & Feducia, 2019). Destarte, a relação entre as concepções baseia-se na compreensão da natureza dos modelos na Ciência. Autores como Justi (2006) e Vasconcelos e Arroio (2013) ressaltam que o trabalho com modelos no contexto de ensino deveria ser realizado de forma a enfatizar aos estudantes que modelos são representações parciais de fenômenos, criados pela mente humana (têm limitações) e estão sujeitos às modificações.

No entanto, a construção e o uso de modelos 3D impressos para o ensino e a aprendizagem de Ciências ainda é um tema pouco discutido em pesquisas brasileiras. Por outro lado, no contexto internacional a impressora 3D têm sido uma ferramenta amplamente utilizada em diferentes áreas, como a medicina, a odontologia, a topografia, e o ensino de ciências em particular (Scalfani & Vaid, 2014; Kaliakin, Zaari & Varganov, 2015; Meyer, 2015; Smiar & Mendez, 2016; Cataldo, Griffith, & Fogarty, 2018; Calcabrini & Onna, 2019; Kondinski & Parac-Vogt, 2019). Estes autores reportam benefícios do uso da impressão tridimensional como uma estratégia inovadora e eficaz para o ensino e a aprendizagem de diversos conceitos científicos.

Mediante a essa lacuna na literatura, pretendemos colaborar com as discussões sobre a participação de estudantes em atividades de modelagem tridimensional, em especial, sobre o assunto modelos 3D impressos para a aprendizagem de conceitos científicos escolares. Neste trabalho a interação enzima-substrato foi escolhida porque, além de exigir do estudante o desenvolvimento do pensamento abstrato para compreensão da atividade das enzimas, não existem estudos sobre a criação e o uso de modelos 3D impressos para aprendizagem desse conceito. Desta forma, as dificuldades<sup>2</sup> dos estudantes com relação à compreensão do conceito de interação enzima-substrato devido à sua complexidade, o contexto atual das pesquisas brasileiras, bem como a disponibilidade de uso da impressora 3D na instituição, fomentou nosso interesse em torno do uso de modelos 3D impressos como uma ferramenta para a aprendizagem do conceito em questão. Neste artigo, também nos propusemos a apresentar alguns resultados de uma pesquisa de mestrado concluída recentemente pela primeira autora.

Com base nas aproximações entre os processos de modelagem científica na Ciência (Justi, 2006; Paganini, Justi & Mozzer, 2014) e a modelagem tridimensional (Meyer, 2015; Griffith, Cataldo, & Fogarty, 2016), neste estudo, buscamos responder a seguinte questão de pesquisa: *quais reflexões o processo de modelagem tridimensional, como estratégia de ensino e aprendizagem do conceito de interação enzima-substrato, proporcionou aos futuros professores de química? Considerando as reflexões sobre o processo da modelagem, propomos uma questão auxiliar: quais aspectos da modelagem científica podem ser utilizados*

<sup>1</sup> Para Justi (2010) o termo não linear refere-se à influência que uma etapa tem sobre a outra no processo de modelagem.

<sup>2</sup> Tais dificuldades foram investigadas por meio do levantamento de informações da literatura, relatos do professor responsável pela disciplina de Bioquímica e pelos próprios estudantes participantes da pesquisa, por exemplo, a dificuldade em compreender a dinâmica do processo em que as interações químicas provocam a mudança na conformação da enzima.

*para orientar professores e pesquisadores no desenvolvimento de atividades de modelagem tridimensional no ensino de ciências?*

## REFERENCIAL TEÓRICO

### Modelos no ensino de Ciências

Modelos podem ser considerados recursos didáticos elaborados a partir de um ou mais objetivos específicos, criados especialmente para favorecer o processo de ensino e a aprendizagem (Gilbert & Treagust, 2009). Dentre as principais funções dos modelos, destacamos o desenvolvimento de habilidades visuais necessárias para visualização de fenômenos observáveis (nível macroscópico) e não observáveis (nível submicroscópico) (Carlisle, Tyson, & Nieswandt, 2015).

Na perspectiva de Blanco-Anaya, Justi e Bustamante (2017), os modelos consistem em representações parciais (não são a realidade) de um determinado conceito, acontecimento ou objeto, criado a partir de um conjunto de ideias que se inter-relacionam na mente humana. Esses mesmos autores destacam que, tanto professores como estudantes podem ter acesso a essas representações internas<sup>3</sup>, desde que as ideias que o indivíduo tem em sua mente sejam expressas por meio do uso de um ou mais modos de representação<sup>4</sup>.

A Ciência Cognitiva aponta que as representações internas correspondem aos modelos mentais, os quais podem ser expressos individualmente ou em grupo (modelos expressos) e revelar o entendimento sobre o conceito ou fenômeno que está sendo modelado (Lee, Chang, & Wu, 2015). Johnson-Laird (1980) propõe em sua teoria que os modelos mentais podem ser construídos com base em informações verbais ou perceptivas subjacentes ou não aos processos de pensamento e a percepção nos objetos equivalentes ao mundo real. Outrossim, Moreira (2011) compreende os modelos mentais como sendo representações internas, não estáveis, corretas ou não e descartáveis, construídas quando um indivíduo enfrenta uma situação nova. Moreira (1996) destaca que os modelos mentais podem ser reformulados conforme necessário, no sentido de promover a reconstrução de novos conhecimentos.

Justi (2010) ressalta, inclusive, que um modelo expresso pode se transformar em um modelo consensual quando um grupo de indivíduos realiza a escolha de um modelo expresso de maneira consensual. A autora também afirma que, caso o modelo seja escolhido em consenso por um grupo de cientistas e compartilhado com o objetivo de utilizar o modelo consensual em práticas de alfabetização científica, este modelo passa a ser considerado um “modelo científico”. Modelos científicos ou conceituais, por sua vez, são representações elaboradas para explicar cientificamente um determinado fenômeno (Ornek, 2008), por exemplo, o modelo do DNA proposto por Watson e Crick (Gilbert, 2005).

Atualmente, o propósito dos modelos no ensino de ciências tem sido favorecer a socialização de ideias entre estudantes e professores (Gilbert, 2013), de forma a contribuir para o processo de construção de explicações e previsões sobre acontecimentos ou fenômenos químicos (Souza & Justi, 2010, 2011). Além disso, podem servir de apoio para a interpretação de resultados de experimentos científicos em laboratórios de ciências (Meyer, 2015). Considerando os apontamentos desses autores, é possível observar que os modelos consistem em recursos didáticos amplamente utilizados em investigações científicas, no sentido de favorecer o processo de ensino e aprendizagem (Gilbert & Treagust, 2009).

### Modelos 3D impressos e implicações no ensino

Sob a perspectiva de Gilbert (2004) e Lee *et al.* (2015), modelos 3D impressos podem ser definidos como representações concretas de conceitos ou fenômenos, os quais são expressos a partir de materiais resistentes, por exemplo, o plástico; e que possibilitam a visualização tridimensional (dimensões y, x e z) da entidade a ser modelada. Estes modelos 3D podem ser obtidos por meio do uso de impressoras tridimensionais.

Desde o final da década de 1980 a utilização da impressora tridimensional vem crescendo de forma progressiva. Na atualidade, o uso desta tecnologia continua trazendo benefícios em diversas áreas, por exemplo, a odontologia, a arqueologia, especialmente, as áreas de educação, ciência e desenvolvimento

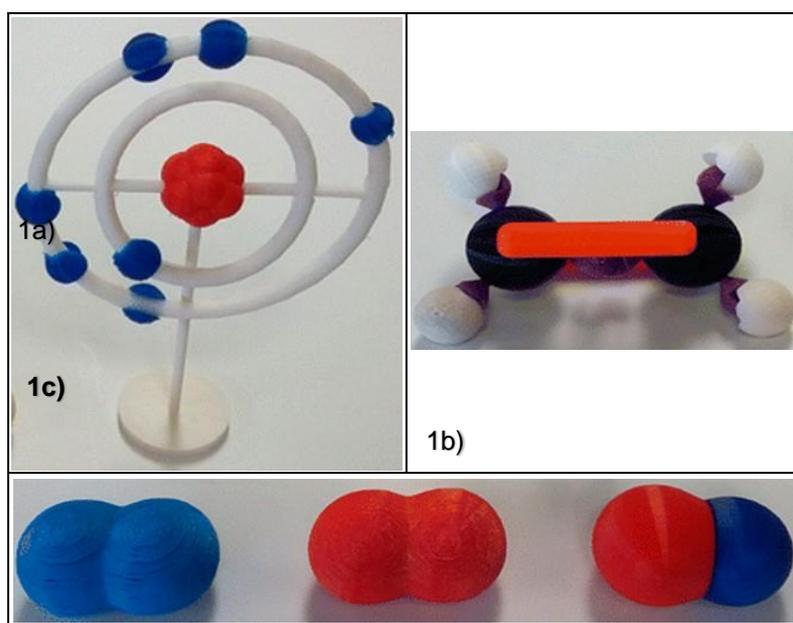
<sup>3</sup> Representações internas podem ser compreendidas como imagens mentais ou construções mentais individuais de uma pessoa (Gilbert, 2010).

<sup>4</sup> Sob a perspectiva de Justi (2015) modos de representação correspondem ao modo como um modelo mental pode ser expresso, os quais podem ser: concreto, verbal, visual, matemático ou gestual.

sustentável (Canessa, 2013). De acordo com Canessa (2013) a aquisição de uma impressora tridimensional pode ser considerada razoavelmente acessível para universidades, fundações de pesquisas ou empresas privadas. Geralmente, para a impressão dos modelos educacionais é utilizado o ácido polilático (PLA) em razão das características deste plástico, por exemplo, a resistência do material, o custo e, sobretudo, por ser mais facilmente degradado no meio ambiente.

No ensino de ciências, os modelos 3D impressos são considerados materiais didáticos<sup>5</sup> que podem facilitar a visualização de representações de processos submicroscópicos (não observáveis) e possibilitar a compreensão de fenômenos que exigem altos níveis de abstração (Jager, 2016). Dentre as possíveis contribuições do uso dos modelos 3D impressos no contexto do ensino, destacam-se: a construção de modelos 3D para o ensino do conceito de simetria de estruturas moleculares (Scalfani & Vaid, 2014); ensino do conteúdo de geometria molecular, conformação e estereoquímica (Carrol & Blauch, 2017); construção de representações dos orbitais de hidrogênio (Griffith *et al.*, 2016) e para a compreensão dos conceitos de energia livre e potencial (Kaliakin *et al.*, 2015). Esses estudos apontam a relevância do uso de modelos 3D impressos como ferramenta para a aprendizagem destes conceitos pelos estudantes.

Modelos 3D podem ser projetados com o auxílio de programas de design assistido por computador (CAD), para que sejam definidas as dimensões e volume das peças dos modelos. Dentre os softwares que oferecem licença gratuita para professores e pesquisadores estão: (i) AutoCad® e (ii) Sketch App® (Brown, 2015). Alguns arquivos prontos para impressão tridimensional, bem como os detalhes do design das peças dos modelos 3D encontram-se disponíveis em periódicos, por exemplo, o modelo de Bohr (figura 1a), o modelo de hibridação (figura 1b) e o modelo da polaridade das ligações (figura 1c) elaborados por Smiar e Mendez (2016) para atividades de ensino e aprendizagem desses conceitos químicos.



**Figura 1** – (a) Modelo 3D impresso de Bohr. (b) Modelo 3D impresso de hibridação. (c) Modelo 3D impresso da polaridade das ligações extraído de Smiar e Mendez (2016, pp. 1592-1593).

Entretanto, autores como Canessa (2013) e Smiar e Mendez (2016) relatam que a impressão tridimensional apresenta algumas limitações, as quais são: (i) custo da impressora e do material, (ii) restrição do tamanho das peças que varia entre 5 a 14 cm (dependendo da capacidade da impressora), (iii) tempo de impressão (que varia de uma a quatro horas), e (iv) falha operacional. Por outro lado, ressaltamos algumas possíveis medidas para superação das limitações, como: (i) a projeção e impressão dos modelos 3D em peças separadas, ampliando as possibilidades de montagens entre as peças, (ii), uso de nobreak ou gerador de energia para evitar a interrupção da impressão em caso de falta de energia, e (iii) produção de peças menores para economia de material e tempo de impressão. Além disso, parcerias entre universidades e

<sup>5</sup> Materiais didáticos são compreendidos como sendo materiais construídos com objetivos específicos, sobretudo facilitar a aprendizagem (Botas & Moreira, 2013). Nesta perspectiva, modelo 3D é considerado um tipo de material didático que pode ser classificado como sendo uma nova tecnologia para o ensino e a aprendizagem.

laboratórios de pesquisa podem viabilizar o acesso à impressora tridimensional a professores e pesquisadores para fins de pesquisa e ensino.

### Modelagem tridimensional na ciência: uma aproximação com a modelagem científica

Alguns estudos como os de Justi (2015) e Paganini *et al.* (2014), caracterizam as etapas do processo de modelagem científica que orientam práticas de investigações científicas em geral. Conforme apontam Mozzer e Justi (2018, p. 161) “a modelagem, entendida como prática científica epistêmica, envolve ciclos recorrentes de criação, expressão, testes e avaliação de modelos”. Segundo esses autores, essas são as etapas fundamentais para o planejamento de atividades de modelagem e recomendam, inclusive, o esclarecimento do significado das etapas e discussão sobre as subetapas envolvidas no processo de elaboração dos modelos.

Muitos trabalhos apontam sobre as etapas envolvidas no processo de modelagem científica, entretanto, não há um consenso das principais etapas da modelagem tridimensional no ensino de ciências. Apesar da existência de relatos na literatura sobre os procedimentos para impressão tridimensional das representações por meio do uso de softwares específicos (Scalfani & Vaid, 2014; Brown, 2015; Kaliakin *et al.*, 2015), não há apontamentos a respeito da similaridade entre as etapas de construção de modelos 3D com o processo de modelagem científica.

Nesse sentido, entendemos a importância da proposição de um modelo de modelagem que promova a discussão do processo de modelagem utilizado por professores e pesquisadores, de modo que os elementos da modelagem tridimensional sejam considerados e relacionados às etapas da modelagem científica. Em seu trabalho intitulado “O ensino de ciências baseado na elaboração de modelos”, Justi (2006, p. 177, tradução nossa) apresenta um processo geral para construção dos modelos na Ciência. Um esquema explicitando as relações adicionais entre a modelagem científica e a modelagem tridimensional, bem como os estágios sugeridos para construção (criação) de modelos 3D impressos é representado na Figura 2.

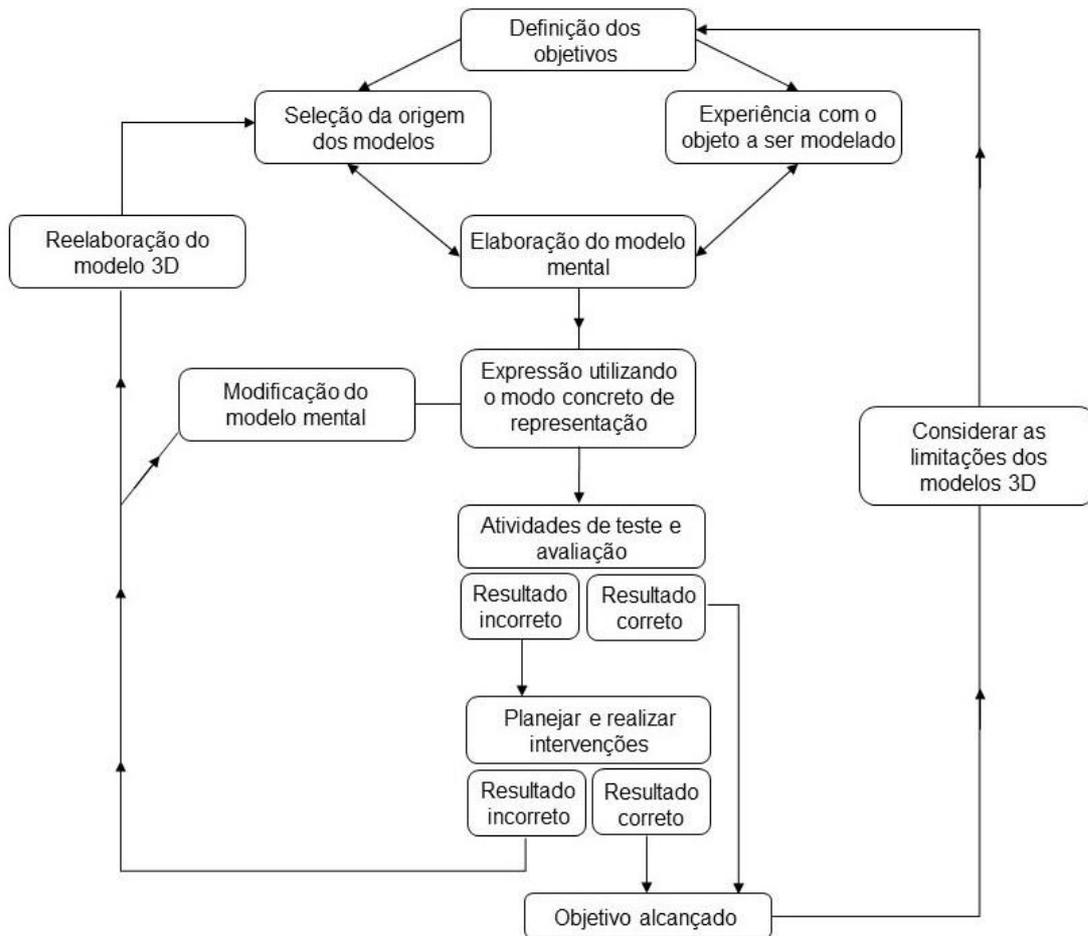


Figura 2 – Modelo para o processo de construção dos modelos na Ciência adaptado de Justi (2006, p. 177).

Conforme destaca Justi (2006), no âmbito do ensino de ciências os modelos são criados a partir de objetivos específicos. Dessa forma, o estágio inicial da modelagem consiste na definição dos objetivos, por exemplo, o ensino e a aprendizagem de um determinado conceito científico e na identificação das experiências que os indivíduos têm em relação ao objeto a ser modelado. Por exemplo, a investigação do conhecimento prévio sobre o conceito ou fenômeno a ser modelado pode revelar as dificuldades dos estudantes em relação à aprendizagem conceitual, direcionando o professor no planejamento das atividades de intervenção. Outrossim, afirmam Muñoz-Campos, Franco-Mariscal e Branco-López (2018) quando destacam que as informações sobre o modelo inicial dos estudantes devem ser verificadas antes do planejamento das intervenções didáticas. Simultaneamente, ocorre a seleção da origem dos modelos, que inclui a escolha dos aspectos ou situações da realidade que serão utilizados na descrição do objeto a ser modelado (Justi, 2006). Estes elementos são integrados na etapa de elaboração (criação) do modelo mental.

Em seguida, os constructos mentais (modelos mentais) são expressos utilizando alguma forma de representação (concreto, verbal, visual, gestual ou matemático) e, assim, podem ser acessados por outras pessoas. Diversos autores (Prain & Tytler, 2012; Gilbert, 2013; Abulia et al., 2016; Jiménez-Tenorio, Núñez & Martínez, 2016) ressaltam o uso de ferramentas pictóricas (desenhos) para expressão dos modelos mentais. Nesta perspectiva os próprios estudantes elaboram suas representações de acordo com os seus conhecimentos prévios sobre o fenômeno a ser modelado. Quanto ao processo de modelagem tridimensional, as representações mentais (desenhos) podem ser utilizadas para a construção dos modelos 3D. No caso de propostas de atividades para utilização da impressora tridimensional é necessário transferir o desenho elaborado para um software específico para a impressão 3D.

Similarmente à modelagem científica, durante o processo de modelagem tridimensional as atividades para teste e avaliação dos modelos podem ser realizadas de maneira empírica ou mental, considerando a disponibilidade para conclusão dos testes e as características dos objetos modelados. Conforme explica Justi (2015), a etapa de avaliação dos modelos pretende identificar as abrangências e limitações dos modelos, no sentido de avaliar se o modelo elaborado é coerente com os seus objetivos, buscando possibilitar a utilização dos mesmos em diferentes contextos.

Ademais, ressalta-se que durante o processo não apenas da modelagem científica, mas também da modelagem tridimensional é fundamental a participação dos estudantes em todas as etapas propostas para a elaboração dos modelos. A esse respeito, Souza e Justi (2011, p. 37) relatam que:

*“[...] a introdução dos alunos em atividades de construção de modelos pode permitir que eles desenvolvam conhecimentos específicos por meio dos próprios modelos criados e, acima de tudo, da interação proporcionada pelos debates com o grupo. Além disso, eles terão oportunidades de avaliar tais modelos, podendo desenvolver um potencial crítico em relação aos modelos utilizados no ensino e na Ciência. Por fim, terão a oportunidade de compreender o processo de construção dos mesmos – sob um aspecto geral e na Ciência”.*

Em uma aproximação às ideias de Justi (2006) a respeito do processo de modelagem científica, entendemos que, inicialmente os estudantes podem formar grupos para elaborar e socializar seus modelos. Na sequência, os grupos podem interagir apresentando argumentos sobre as similaridades e contradições dos modelos escolhidos. Por último, os estudantes podem socializar e discutir sobre seus modelos com o restante da turma de modo a favorecer a troca de ideias e reflexões sobre as limitações dos modelos.

No presente artigo propomos que as atividades de intervenção são necessárias caso o modelo elaborado apresente incoerências (resultado incorreto), isso em termos da não equivalência entre os modelos criados pelos estudantes e o modelo cientificamente aceito. Com base nos conhecimentos prévios dos estudantes, o professor pode identificar possíveis equívocos ou dificuldades de aprendizagem, as quais devem ser superadas no decorrer das atividades de modelagem, por meio das intervenções (Muñoz-Campos et al., 2018).

De maneira geral, as atividades de intervenção podem propor, adicionalmente, o uso de ferramentas de visualização 2D e 3D, como os softwares e animações, os quais podem contribuir para o desenvolvimento das habilidades visuais necessárias para a construção do conhecimento químico (Ferreira & Arroio, 2013). Acrescentamos, entretanto, que o professor deve favorecer as discussões dos códigos das representações, negociar ideias e oferecer condições para que os estudantes possam construir e/ou reformular seus modelos quando for necessário (Justi, 2006; Souza & Cardoso, 2008).

## **METODOLOGIA**

### **Contextos e métodos de pesquisa**

A presente pesquisa foi implementada durante o ano de 2018, envolvendo a participação de quinze estudantes do 7º período do curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), localizada no Sul de Minas Gerais. O contexto escolhido para o desenvolvimento da pesquisa foi uma turma de estudantes, matriculados na disciplina Laboratório de Ensino de Química II. A escolha dos sujeitos considerou o plano curricular no período da investigação, o qual previa o ensino do conteúdo de “Enzimas” na disciplina de Bioquímica. A investigação foi conduzida após a aprovação da pesquisa pelo Comitê de Ética em Pesquisa, protocolo número 2.420.833. Todos os participantes (estudantes e professores), após a apresentação da pesquisa, aceitaram participar como voluntários e assinaram os termos de consentimento livre e esclarecido e de autorização da gravação de voz e imagem.

O estudo desenvolvido apresenta uma abordagem qualitativa e interpretativa (Minayo, 2009), pois consistiu na investigação, compreensão e interpretação dos acontecimentos durante o processo de construção de significados pelos estudantes. Quanto aos objetivos, a pesquisa tem caráter exploratório, já que as informações foram obtidas por meio de entrevistas e questionários aos sujeitos da pesquisa, durante um trabalho de campo no contexto social investigado (sala de aula) (Gerhardt & Silveira, 2009).

O planejamento da pesquisa seguiu o processo interativo de elaboração e reelaboração, expressão, teste e avaliação de modelos (Justi, 2006, figura 2), envolvendo, cinco atividades de intervenção com duração de, aproximadamente, 1h40, as quais são descritas neste trabalho. Destaca-se que durante os momentos de implementação das intervenções, a professora responsável pela disciplina acompanhou e colaborou com o planejamento e execução das atividades. Em relação ao conteúdo trabalhado nas intervenções, o mesmo foi planejado com a participação do professor responsável pela disciplina de Bioquímica.

### **Sequência de atividades de intervenção**

A sequência de atividades de intervenção foi proposta com base nos resultados das análises prévias das entrevistas, que demonstraram os aspectos relacionados às dificuldades de aprendizagem do conceito de interação enzima-substrato pelos estudantes. A sequência de ensino planejada foi validada pelo professor da disciplina de Bioquímica e pelos membros do grupo de pesquisa em Educação Química da UNIFAL/MG. Após o processo de validação consensual, as atividades foram reformuladas de modo a atender as recomendações dos professores especialistas. A segunda versão (projeto piloto) dessas atividades consiste em um dos objetos de estudo e discussão do presente artigo.

Em um primeiro momento elaboramos uma atividade considerando os estudos sobre representações mentais, particularmente os de Prain e Tytler (2012), Jiménez-Tenorio *et al.* (2016), Muñoz-Campos *et al.* (2018), visando obter informações sobre o conhecimento prévio dos estudantes a respeito do conceito em questão. Com base nas perspectivas desses autores também propusemos que os estudantes elaborassem um desenho que representasse a interação enzima-substrato. Também investigamos os pontos de vista dos futuros professores em relação ao uso de modelos 3D no ensino. A atividade foi conduzida por meio de uma entrevista semiestruturada<sup>6</sup>.

Em um segundo momento foram realizadas as intervenções propostas para a construção dos modelos 3D impressos, com o objetivo de contribuir para a aprendizagem do conceito científico proposto. Para o planejamento das intervenções, bem como a construção dos modelos 3D impressos, realizamos cinco etapas denominadas (i) elaboração, (ii) expressão e reelaboração, (iii) identificação das limitações, (iv) reelaboração e testes, e (v) avaliação (quadro 1), apoiando-nos no processo de modelagem científica descritas por Justi (2006) e Mozzer e Justi (2018).

Durante a realização dessas atividades, os estudantes formaram cinco grupos (com 2 ou 3 integrantes cada um) e participaram ativamente por meio de discussões entre eles e com a pesquisadora. Estas discussões eram, inicialmente, realizadas entre os membros dos grupos e, em seguida, socializadas com o restante da turma. Os estudantes argumentavam sobre seus próprios modelos e o dos outros grupos, apresentando suas ideias em relação às similaridades e contradições entre o modelo elaborado e o modelo cientificamente aceito. Além disso, em uma das etapas os estudantes participaram ativamente de atividades de simulações 3D<sup>7</sup> de experimentos para explorar a função e estrutura das enzimas, bem como para identificar

<sup>6</sup> Durante as entrevistas semiestruturadas os estudantes explicavam seus desenhos e justificavam suas ideias. Essa etapa foi fundamental para orientação a respeito da análise dos desenhos.

<sup>7</sup> As atividades foram desenvolvidas por meio do uso dos seguintes softwares: estudo interativo da estrutura e função de proteínas

os fatores que alteram a atividade das enzimas. O objetivo da utilização destas representações foi favorecer o desenvolvimento de habilidades visuais necessárias para a transição entre os níveis macroscópico (aspectos químicos observáveis) e o submicroscópico (aspectos químicos não observáveis). No total foram realizadas cinco atividades de intervenção associadas as etapas da modelagem tridimensional, as quais estão descritas no quadro 1.

**Quadro 1** – Descrição da sequência de atividades de ensino fundamentadas no processo de modelagem científica adaptado de Mozzer e Justi, 2018.

Atividades de intervenção	Descrições das atividades	Etapas
1	1.1. Apresentação de exemplos de enzimas e do mecanismo de ação das enzimas <sup>8</sup> . 1.2. Utilização de representações em 3D de enzimas para o estudo dos movimentos rotacionais e dos aminoácidos que constituem as enzimas. 1.3. Utilização de simulações em 3D de experimentos para o estudo dos fatores que influenciam a atividade enzimática (pH, temperatura e concentração).	Elaboração
2	2.1. Identificação dos aspectos químicos comuns nos três mecanismos de ação das enzimas <sup>9</sup> . 2.2. Relato escrito dos aspectos químicos identificados nos mecanismos de ação trabalhados. 2.3. Identificação das semelhanças e contradições entre os modelos 3D iniciais com as representações dos mecanismos de ação estudados. 2.4. Reformulação, quando necessário, dos modelos elaborados inicialmente.	Expressão e Reelaboração
3	3.1. Observação de representações da interação enzima-substrato nos livros didáticos de química. 3.2. Discussão das limitações do uso destas representações para o ensino do conceito de interação enzima-substrato <sup>10</sup> . 3.3. Discussão a respeito das limitações dos modelos 3D impressos para o ensino do conceito de interação enzima-substrato. 3.4. Apresentação do modelo 3D impresso de ajuste induzido.	Identificação das Limitações
4	4.1. Reelaboração ou adaptação dos desenhos apresentados na atividade de intervenção 2. 4.2. Explicação do conceito de interação enzima-substrato pelos estudantes utilizando o modelo 3D reelaborado.	Reelaboração e Testes
5	5.1. Comparação entre os elementos codificados nos modelos 3D impressos reelaborados com o modelo cientificamente aceito. 5.2. Apresentação de uma proposta de atividade que utilize os modelos 3D elaborados como recurso pedagógico.	Avaliação

Esta etapa se refere à implementação das atividades de elaboração, expressão, teste e avaliação de modelos 3D impressos e teve como objetivo contribuir para a aprendizagem de um conceito científico escolar. Buscamos também contribuir para a formação dos futuros professores de Química, no sentido de repensar o uso de modelos e da modelagem em suas práticas de ensino. Após a realização das quatro etapas da modelagem, os modelos 3D foram reelaborados, testados e avaliados pelos estudantes, na tentativa de aproximar os modelos 3D elaborados com o modelo cientificamente aceito.

### Instrumentos de geração e análise de dados

Como instrumentos de geração de dados, foram utilizados desenhos, documentos escritos para apoio dos estudantes (relatos pessoais) ao longo das atividades, entrevistas e diário de pesquisa da pesquisadora. As gravações de som e imagem permitiram o registro das atividades durante as etapas propostas para a modelagem tridimensional. Já os gravadores de áudio possibilitaram o registro das respostas dos estudantes às questões do roteiro de entrevistas semiestruturadas individuais. Tendo em vista garantir o sigilo dos

(Sakabe, Marson & Torres, 2006); enzyme (Galembeck & Filho, 2007) e cinética da reação enzimática (Galembeck, Filho & Torres, 2007).

<sup>8</sup> O objetivo inicial foi destacar que independentemente do local de ação, alguns aspectos químicos são comuns a qualquer interação entre enzima e substrato, por exemplo, as interações químicas e a mudança de conformacional das enzimas (Sangiogo & Zanon, 2012).

<sup>9</sup> Três mecanismos de ação de enzimas foram distribuídos para discussão e identificação de elementos comuns nas três representações entre os membros do grupo. Os mecanismos utilizados foram: A. das lipases (de Vaz & Choupina, 2012), B. da quimotripsina (Zangiogo & Zanon, 2012) e C. das proteases virais (Muri, 2014).

<sup>10</sup> Questão desencadeadora da discussão: o modelo chave-fechadura representa toda a complexidade da interação entre a enzima e o substrato?

sujeitos, os nomes dos quinze sujeitos participantes foram substituídos por códigos identificados de E1 a E15 e P para representar a fala do pesquisador.

A justificativa da realização das entrevistas individuais está associada a escolha do instrumento utilizado para a investigação do conhecimento prévio dos estudantes sobre o conceito de interação enzima-substrato (desenhos). Neste sentido, a entrevista possibilitou ao estudante a explicação do seu próprio desenho. A entrevista semiestruturada pode ser entendida sob o ponto de vista de Szymanski, Almeida e Prandini (2004) como um instrumento de interação humana que busca informações sobre assuntos complexos e subjetivos de interesse da pesquisa, por exemplo, opiniões e formas de pensamento. Relatos pessoais também foram utilizados tendo como objetivo obter informações dos acontecimentos em relação à participação dos estudantes nas atividades de modelagem tridimensional (Groppo & Martins, 2006). Durante a realização da investigação no contexto da sala de aula, o diário de campo possibilitou o registro de percepções nas situações de aula e reflexões sobre a prática didática. A importância do uso do diário de campo tem relação com as possibilidades de contribuições para a compreensão, análise e interpretação dos dados com base nos fundamentos teóricos (Barbosa & Hess, 2010).

Para organizar e analisar as informações utilizamos a técnica de análise de conteúdo propostas por Bardin (2016), que consiste em um conjunto de procedimentos para descrição dos dados, bem como a inferência de conhecimentos acerca do conteúdo das respostas. Dentre os tipos de modelos de análise de conteúdo, utilizamos a análise temática (Minayo, 2009) com o objetivo de estabelecer a identificação da frequência ou ausência de núcleos de sentido (ou padrões de respostas) durante a análise das informações. Particularmente a respeito da análise temática, Minayo (2009, p. 88) pontua que a análise temática envolve as etapas de pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados que podem ser descritos na seguinte sequência:

- (a) *“decompor o material a ser analisado em partes (o que é parte vai depender da unidade de registro e da unidade de contexto que escolhemos);*
- (b) *distribuir as partes em categorias;*
- (c) *fazer uma descrição do resultado da categorização (expondo os achados encontrados na análise);*
- (d) *fazer inferências dos resultados (lançando-se mão de premissas aceitas pelos pesquisadores);*
- (e) *interpretar os resultados obtidos com auxílio da fundamentação teórica adotada”.*

### **Validação da pesquisa**

Três professores pesquisadores especialistas na área de ensino de ciências participaram dos momentos de validação dos instrumentos de geração de informações, das propostas de atividades e verificação da concordância da classificação das categorias durante a fase de análise prévia dos resultados. Utilizamos os pressupostos teóricos de Creswell (2014) para o julgamento da credibilidade desta pesquisa e realizamos a validação consensual e a triangulação dos dados. Para o autor a validação consensual procura a concordância entre indivíduos capacitados para avaliar e sugerir alterações nas interpretações das situações ou instrumentos utilizados no contexto investigado.

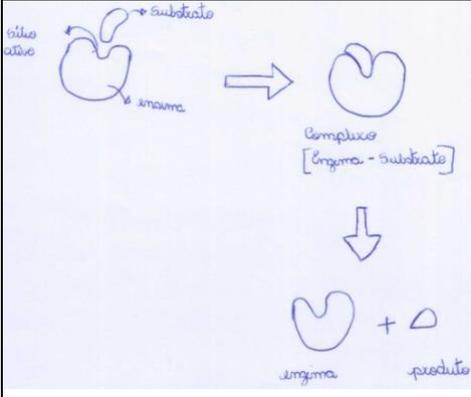
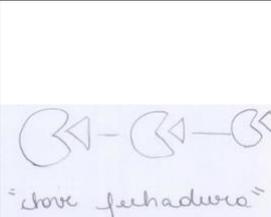
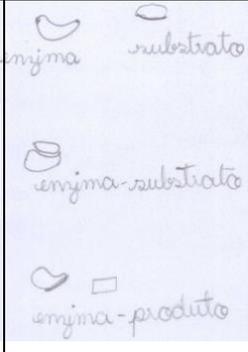
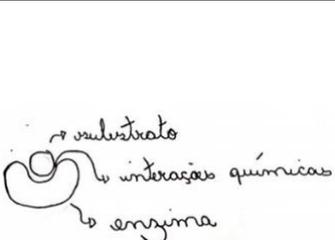
Durante a etapa de validação consensual foram realizados encontros individuais com os professores para validação dos instrumentos e categorias obtidas. Após estes encontros, eram realizadas as alterações necessárias conforme as refutações estabelecidas entre os validadores. Além disso, as atividades de intervenção propostas foram validadas pelos membros do grupo de pesquisa em Educação Química da UNIFAL/MG e pelo professor responsável pela disciplina de Bioquímica.

Para assegurar a relevância da análise dos dados, bem como a confiabilidade do estudo também utilizamos o processo de triangulação, no qual Flick (2009) define como sendo um método que envolve a combinação entre diferentes técnicas interpretativas, visando diminuir as limitações da utilização de uma única técnica em estudos qualitativos. Para tal, realizamos o cruzamento das informações obtidas por meio dos desenhos, das entrevistas, relatos pessoais e diário de pesquisa, que são alvos das discussões aqui apresentadas.

## RESULTADOS

Durante o levantamento dos conhecimentos prévios sobre a interação enzima-substrato, foi solicitado aos quinze estudantes que elaborassem representações (desenhos) da interação enzima-substrato, o que nos levou a refletir sobre a necessidade de reformulá-los (quadro 2).

**Quadro 2** – Representações da interação enzima-substrato, antes das atividades da sequência de ensino, estudantes E2; E8; E9 e E13.

Desenho inicial (E2)	Desenho inicial (E8)	Desenho inicial (E9)	Desenho inicial (E13)
 <p>Figura 3. Desenho da interação E-S (E2).</p>	 <p>Figura 4. Desenho da interação E-S (E8).</p>	 <p>Figura 5. Desenho da interação E-S (E9).</p>	 <p>Figura 6. Desenho da interação E-S (E13).</p>

Nestes exemplos de desenhos, é possível notar que, na tentativa de explicar a interação enzima-substrato, estes estudantes revelaram pensar no modelo chave-fechadura (quadro 2), que, segundo Marzocco e Torres (2007) e Sangiogo e Zanon (2012), apresenta muitas limitações, tais como a não representação da complexidade da interação, que pode contribuir para a construção de ideias equivocadas, por exemplo pensar que os substratos se “encaixam perfeitamente” nas enzimas.

Com a intenção de investigar mais profundamente as ideias expressas nos desenhos, realizamos as entrevistas. Durante as entrevistas foi solicitado aos estudantes que respondessem ao seguinte questionamento: “Como você explicaria a interação enzima-substrato utilizando sua representação?”. Dentre as explicações, quatro estudantes apresentaram as seguintes explicações:

E2: “Então, que a enzima, ela entra em contato com o substrato por meio do sítio ativo, sendo que, esse sítio ativo ele é... (pausa na explicação) ele tem particularidades, igual o substrato. Sendo assim, ela vai formar um complexo substrato e enzima, e logo após ela vai soltar o substrato como se fosse um produto, ou seja, ele muda sua característica (...).”

E8: “Eu utilizaria falando que a enzima e o substrato são dois compostos que juntos eles se...(pausa na explicação) como eu posso dizer... (pausa na explicação) formam... (pausa na explicação) formam uma coisa só, um depende do outro”.

E9: “Na enzima tem um sítio ativo, em cima, aqui (o estudante aponta para o desenho), aí o substrato ele vai se ligar a esse sítio ativo, formando enzima-substrato, depois ele vai sair formando enzima-produto”.

E13: “Eu iria explicar igual a questão um que eu respondi, que o substrato se liga a enzima para formar produto, assim ativar a função da enzima. Explicaria assim, conforme o meu desenho”.

Antes das intervenções, as respostas (E2, E8, E9 e E13) associadas aos desenhos revelaram que o pensamento dos estudantes se fundamentava em explicações que consideravam a interação enzima-substrato como sendo uma/um ligação/encaixe. Além disso, não consideravam a complexidade da interação

em termos dos aspectos químicos submicroscópicos, por exemplo, as diferentes interações químicas, a mudança conformacional e a atividade cíclica da enzima (aspectos químicos considerados inicialmente em Linenberger & Bretz, 2014, 2015).

Durante as intervenções, quinze estudantes participaram da atividade de intervenção 1, descrita no quadro 1. No momento de realização desta atividade, foram apresentados alguns modelos de representação de enzimas, o mecanismo de ação de determinadas enzimas reais e os estudantes realizaram simulações de experimentos em 3D. Durante a atividade foi esclarecido aos estudantes que a interação entre a enzima e o substrato não ocorre de maneira estática. Pelo contrário, há constante rotação e movimentação da enzima e do substrato de forma a favorecer as interações químicas e a mudança conformacional do sítio ativo da enzima.

Na atividade de intervenção 2, dez estudantes participaram e relataram por escrito os aspectos químicos observados nos três mecanismos de ação das enzimas trabalhados (mecanismos A, B e C). Cada um dos cinco grupos, após observar as representações dos mecanismos de ação e discutirem sobre os aspectos químicos comuns, apresentaram os seguintes relatos:

Grupo 1 (E8): *“A cadeia lateral do aminoácido serina está interagindo com outros aminoácidos através de ligações de hidrogênio. A formação de um intermediário tetraédrico é estabilizada por essas interações”.*

Grupo 2 (E1; E2): *“- Formação de intermediários tetraédricos.*

- Ocorre mecanismos de reações orgânicas.*
- Há pares de elétrons livres interagindo com as demais substâncias.*
- Há a formação do intermediário acil-enzima.*
- Ocorre rompimento de ligações”.*

Grupo 3 (E4; E5; E6) *“Há ligações de hidrogênio”.*

Grupo 4 (E10; E15): *“- Há intermediários entre as reações. Esses intermediários são sempre complexos entre enzima-substrato.*

- No final além do produto também há a enzima que não é consumida.*
- Há rompimento de ligações peptídicas que causam modificação na estrutura.*
- Há afinidade química grande, entre a enzima e o substrato.*
- Há diminuição na energia de ativação”.*

Grupo 5 (E9; E11): *“- Formação de intermediário tetraédrico”.*

Percebemos a partir dos relatos dos estudantes que alguns aspectos químicos comuns foram identificados nos mecanismos de ação das enzimas, por exemplo, a formação de intermediário tetraédrico e a presença de interações químicas, especialmente as ligações de hidrogênio. Tais relatos sugerem que estes estudantes foram conduzidos a pensar na interação enzima-substrato como sendo um processo dinâmico, complexo e, que envolve diferentes aspectos químicos fundamentais em qualquer mecanismo de ação enzimática.

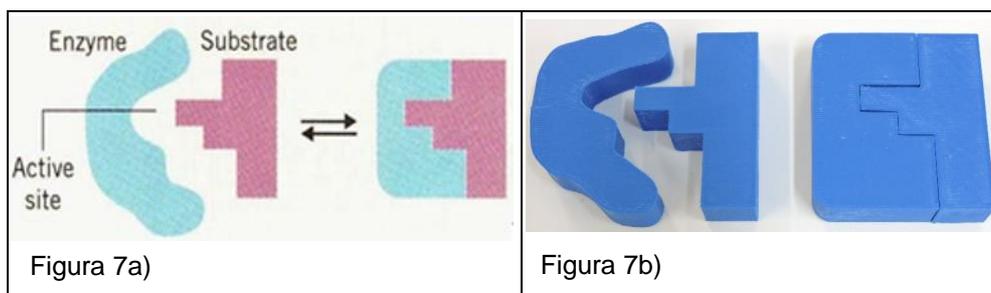
Ainda na atividade de intervenção 2 (quadro 1) foi solicitado aos estudantes para que observassem as semelhanças e as contradições entre os modelos 3D iniciais e as representações dos mecanismos de ação trabalhados. Além disso, os próprios estudantes foram orientados sobre a escolha em continuar utilizando os modelos elaborados inicialmente ou reformulá-los, de forma que fossem estabelecidas as relações entre os modelos 3D elaborados e os aspectos químicos observados nos mecanismos de ação das enzimas. Após as discussões, foi solicitado novamente aos estudantes que representassem a interação enzima-substrato. Neste momento da atividade, os estudantes elaboraram, individualmente, as representações e, na sequência, interagiram com seus membros do grupo para escolherem, consensualmente, uma representação, que foi utilizada para projeção dos modelos 3D impressos.

Para esclarecer melhor sobre as implicações do uso do modelo chave-fechadura (quadro 2) enquanto modelo para explicar a interação enzima-substrato propusemos a atividade de intervenção 3, descrita no quadro 1. Neste estágio foram realizadas as discussões sobre o significado de modelos e modelagem na Ciência com base nas perspectivas de alguns autores como Gilbert (2004), Justi (2010) e Taber (2013), com a intenção de situar estes futuros professores nas etapas da modelagem científica propostas e permitir que os mesmos repensassem o uso do modelo chave-fechadura em suas futuras práticas de ensino.

As discussões sobre a natureza dos modelos e modelagem na Ciência têm sido reportadas por alguns autores, os quais destacam a importância destas discussões para a reflexão de futuros professores a respeito das limitações dos modelos (Justi, 2010; Krell, Belzen & Krüger, 2014). O tema da discussão era sobre as limitações do uso do modelo chave-fechadura, particularmente as representações de livros didáticos, como apontam (Marzzoco & Torres 2007; Sangiogo & Zanon, 2012). Quatorze estudantes participaram desta atividade e responderam ao seguinte questionamento, também descrito por Sangiogo e Zanon (2012, pp. 31-32): “O modelo chave-fechadura representa toda a complexidade da interação entre a enzima e o substrato?”.

O principal objetivo desta discussão foi favorecer a reflexão a respeito da escolha do modelo chave-fechadura para ensinar o conceito em questão. Buscando contribuir para tal reflexão, propusemos a apresentação do modelo 3D impresso do ajuste induzido (figura 7b). Uma das hipóteses favoráveis ao uso do modelo de ajuste induzido é que o professor pode explicar a interação considerando a mudança de conformação da enzima, e também pode explicar a especificidade da enzima pelo substrato. Todos estes fatores podem contribuir no momento da explicação pelo professor, favorecendo o desenvolvimento do pensamento abstrato no estudante, e, conseqüentemente, superando a ideia de que a interação enzima-substrato acontece por meio de um encaixe físico-mecânico.

Estes pressupostos aqui apresentados levaram em consideração a representação do ajuste induzido (figura 7a) elaborado por Linenberger e Bretz (2015) para explicação da interação enzima-substrato aos estudantes durante a atividade de intervenção 3. Estes autores ressaltam que este é o modelo atualmente aceito pela Ciência para explicação da interação enzima-substrato.



**Figura 7** – 7a) Desenho do modelo ajuste induzido extraído de Linenberger e Bretz (2015). 7b) Modelo 3D impresso de ajuste induzido elaborado com base em Linenberger e Bretz (2015).

A partir do uso do modelo 3D impresso do ajuste induzido (figura 7b) propusemos uma discussão a respeito das diferenças e similaridades entre os modelos 3D impressos criados pelos próprios estudantes e o modelo cientificamente aceito mais atual (modelo de ajuste induzido). Nesta etapa, os estudantes discutiram a respeito dos aspectos químicos que eram possíveis de serem representados no modelo de ajuste induzido impresso, por exemplo, a mudança da conformação na região do sítio ativo da enzima, a especificidade e a atividade cíclica da enzima. Além disso, os estudantes discutiram os aspectos químicos não representados no modelo, por exemplo, as interações químicas, as transformações químicas e a composição estrutural das enzimas e substratos em comparação aos aspectos químicos representados nos modelos 3D impressos elaborados pelos próprios estudantes.

Vale ressaltar que o modelo de ajuste induzido foi apresentado como sendo o modelo atualmente aceito pela ciência e, como qualquer outro modelo é uma representação parcial do conceito, modificável e que apresenta limitações que precisam ser consideradas durante seu uso para explicação do conceito, por exemplo, o professor deve explicar que após a formação do complexo enzima-substrato ocorrem sucessivas transformações químicas até a formação do produto e o rearranjo estrutural da enzima a sua conformação inicial. Para isso, o professor pode fazer uso de outros recursos didáticos que possam contribuir para o desenvolvimento da visão tridimensional do processo de interação entre a enzima e o substrato. Este tipo de esclarecimento pode evitar o surgimento de ideias equivocadas sobre o conceito científico e sobre o significado de modelos na Ciência. Estas limitações foram reconhecidas pelos estudantes ao longo da atividade por meio da comparação entre seus próprios modelos e o modelo de ajuste induzido. Durante as discussões os estudantes refletiram e sugeriram algumas possíveis adaptações nos seus próprios modelos:

E4: “A atividade cíclica eu iria propor mais modelos, mais representações, representando as fases das reações, por exemplo, ... (pausa) um produto que teria uma conformação diferente do substrato e uma enzima com a mesma conformação

inicial. A mudança conformacional poderia ser superada com o uso de um modelo maleável”.

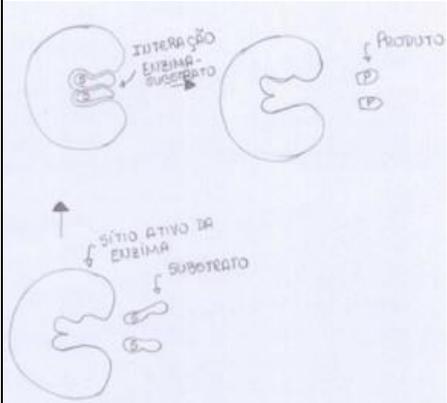
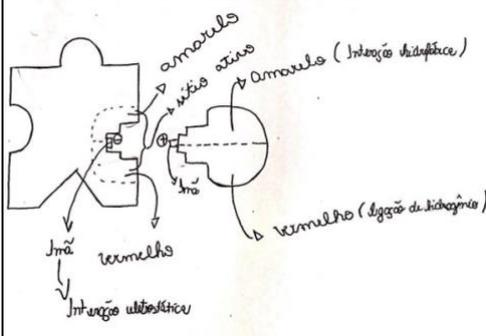
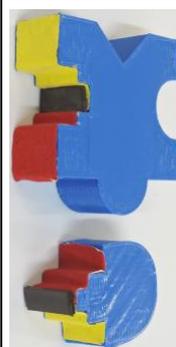
E6: “Iria propor o uso de imãs para representar a interação química”.

Em outro relato, um desses estudantes informou que havia pensado em alguns aspectos químicos, por exemplo, as interações entre enzima e substrato, contudo não havia representado no modelo 3D impresso:

E4: “ (...) eu pensei nas interações químicas e nas transformações químicas, mas não representei no desenho”.

Com base nos relatos foi planejada a atividade de intervenção 4, descrita no quadro 1. Para esta atividade foram disponibilizados materiais (imãs, cola quente, tinta, papel Eva, cartolina, etc) como forma de favorecer a construção de conhecimento em relação às possibilidades de adaptações dos modelos 3D impressos para representação dos aspectos químicos da interação. Após a atividade, os estudantes apresentaram seus modelos 3D impressos reelaborados, os quais são apresentadas nos quadros 3 e 4.

**Quadro 3** – Representações escolhidas pelo grupo 3 para a interação enzima-substrato, antes e após as atividades de intervenção 1, 2, 3 e 4.

Representações iniciais		Representações após intervenção	
 <p>Figura 8. Representação da interação E-S (E6).</p>	 <p>Figura 9. Modelo 3D impresso (E6).</p>	 <p>Figura 10. Representação da interação E-S (E6).</p>	 <p>Figura 11. Modelo 3D reimpresso (E6).</p>

Novas representações foram criadas pelos estudantes (quadro 3) como resultado de um processo de modelagem tridimensional adaptado às etapas fundamentais da modelagem científica, como já havia sido descrito anteriormente. No final da atividade de intervenção 4 os estudantes foram chamados em grupo para explicar a interação enzima-substrato utilizando o modelo 3D impresso elaborado, como ilustra o diálogo:

P: “Supondo que vocês são os professores e o conteúdo que será ensinado é a interação enzima-substrato e o recurso didático é o modelo 3D elaborado. Como seria sua explicação para a interação enzima-substrato?”

Grupo 3 (E6): “Aqui nós temos um modelo que vai representar a interação enzima-substrato, certo? A interação enzima-substrato ocorre por meio de interações químicas entre o substrato e uma região específica da enzima (sítio-ativo). Ao interagir com o substrato, há o rearranjo conformacional da enzima. Há a transformação química do substrato em produto e a enzima volta a sua conformação inicial”.

P: “Quando vocês elaboraram o novo modelo vocês incluíram alguma ideia nova, que não havia sido pensado no desenho inicial?”

Grupo 3 (E5): “Nós pensamos nas interações químicas. Porque no primeiro modelo que nós fizemos não havia sido diferenciado os tipos de interações”.

P: *“Vocês utilizariam esse modelo para explicar a interação enzima-substrato?”*

Grupo 3 (E4): *“A representação do sítio ativo ficou bem clara e a questão da especificidade também”.*

P: *“Isso quer dizer que o modelo 3D elaborado está coerente com o objetivo de ensino?”*

Grupo 3 (E4): *“O modelo abrange alguns aspectos conceituais envolvidos na interação enzima-substrato, então ele atinge o objetivo desde que sejam esclarecidas suas limitações”.*

Partindo do pressuposto de que, entender os aspectos químicos que estão limitados a esses modelos é fundamental para entender a interação enzima-substrato, é possível perceber neste trecho de diálogo que estes estudantes passaram a considerar limitações que não haviam sido pensadas anteriormente. Além disso, novas ideias foram estabelecidas na explicação da interação enzima-substrato, por exemplo, o fato de considerarem o *“(…) rearranjo conformacional da enzima (...)”* (E6) e de *“(…) reconhecer a ocorrência de transformação química do substrato em produto e a enzima volta a sua conformação inicial”* (E6).

A partir dessas respostas é possível observar uma tentativa de reconhecimento das limitações em relação ao uso dos modelos para o ensino, que pode ser notado quando o estudante E4 percebe que nem todos os aspectos químicos são representados no modelo, da mesma forma que possuem limitações. É importante ressaltar, segundo Gilbert (2005) e Justi e Gilbert (2003) que a identificação das limitações nos modelos elaborados inclui as discussões sobre os aspectos químicos codificados ou não, que podem favorecer a realização dos testes e da avaliação dos modelos em relação aos seus objetivos de ensino e aprendizagem.

Em seguida, os estudantes explicaram suas ideias em relação aos aspectos químicos considerados para a reelaboração dos modelos 3D impressos (quadro 3), esclarecendo também os novos elementos codificados nos modelos, como apresentado no diálogo a seguir:

Grupo 3 (E6): *“Nesse modelo aqui a gente tem essa peça (demonstra a peça menor do modelo 3D demonstrada na figura 11) que vai representar o substrato e temos esse outro modelo para representar a enzima e o sítio ativo é representado nessa parte (aponta para a peça maior do modelo 3D demonstrada na figura 11)”.*

Grupo 3 (E6) *“Essas cores nós usamos para diferenciar os tipos de interações que ocorrem para que possa ocorrer a interação enzima-substrato. E as interações podem ser do tipo hidrofóbicas (representadas em amarelo) e ligações de hidrogênio (representadas em vermelho), dessa forma eu posso representar as interações. Sabendo que a enzima ela tem sua especificidade, a gente pode pensar que o substrato vai interagir nesta parte aqui... (demonstra no modelo a região onde está localizado o ímã) que representa o sítio ativo da enzima”.*

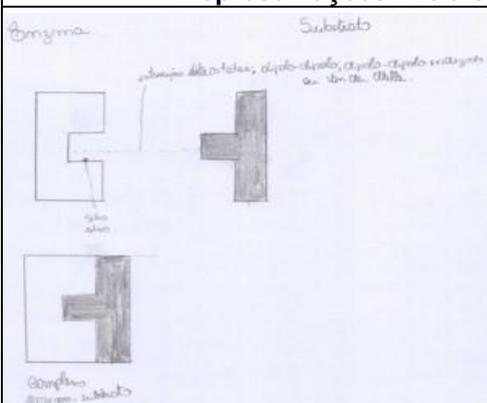
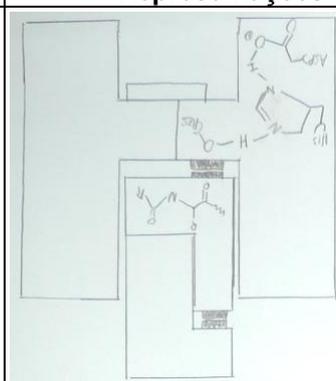
Grupo 3 (E5): *“Então, esse é nosso modelo para representar a interação enzima-substrato. Ele vai ter limitação na questão conformacional”.*

Grupo 3 (E4) *“Outra limitação é que o modelo não representa a atividade cíclica da enzima”.*

Quanto aos aspectos químicos codificados nos modelos, é possível notar que, por meio das semelhanças identificadas entre os modelos reelaborados e os mecanismos de ação das enzimas, estes estudantes passaram a estabelecer uma transição entre o campo macroscópico e o campo submicroscópico do conhecimento relativo a interação enzima-substrato, uma vez que os aspectos químicos submicroscópicos (não observáveis) passaram a ser considerados e representados nos modelos reelaborados. Essa informação também pode ser observada nas representações apresentadas no quadro 4.

**Quadro 4** – Representações escolhidas pelo grupo 2 para a interação enzima-substrato, antes e após as atividades de intervenção 1, 2, 3 e 4.

Legenda: Descrição da escrita da frase da figura 12: (E1) “*interação eletrostática; dipolo-dipolo; dipolo-dipolo induzido ou Van der Waals*”.

Representações iniciais		Representações após intervenção	
 <p>Figura 12. Representação da interação E-S (E1).</p>	 <p>Figura 13. Modelo 3D impresso (E1).</p>	 <p>Figura 14. Representação da interação E-S (E1).</p>	 <p>Figura 15. Modelo 3D reimpresso (E1).</p>

Nestes exemplos de representações, é possível constatar que a participação ativa, nas sequências de atividades, nas discussões em sala de aula e na interação entre os estudantes nos grupos e com a pesquisadora, pode ter favorecido a construção de novas ideias, as quais podem sugerir que muitas dificuldades foram superadas em termos da compreensão dos aspectos químicos existentes em qualquer mecanismo de ação de enzimas. A partir da análise dos desenhos, inicial e final, somos levados a inferir que habilidades visuais foram desenvolvidas durante a sequência de atividades (figuras 12 e 14), as quais possibilitaram construir ideias por meio do pensamento representacional e tridimensional (figura 15).

O resultado do processo de reelaboração dos modelos comparado ao processo de elaboração inicial dos modelos, também pode indicar que novos aspectos químicos foram codificados nos modelos e explicados pelos estudantes, como observado no excerto a seguir:

Grupo 2 (E2) “*No modelo são representadas as interações eletrostáticas (uso de ímãs), mudança conformacional (uso de borracha e bastão de cola que simulam o movimento da enzima, especificamente na região onde ocorre a interação), uso de representações das estruturas químicas da enzima (representada em amarelo) e do substrato (representado em vermelho e lilás)*”.

Essa discussão entre os estudantes, constituiu parte da etapa de avaliação dos modelos durante atividade de intervenção 5 (realizada também pelos próprios estudantes) no processo de modelagem científica adaptado à modelagem tridimensional. A comparação entre os elementos codificados nos modelos 3D impressos reelaborados com o modelo cientificamente aceito também contribuiu para os estudantes refletirem sobre as limitações dos modelos, bem como da escolha do modelo que melhor representasse (em termos químicos) a interação enzima-substrato no momento em que estavam organizados em grupos. Por essa razão, o processo de avaliação estabelecido pelas comparações entre as representações elaboradas anteriormente, foi essencial para a identificação das novas ideias a respeito da interação enzima-substrato pelos estudantes e para a constatação da superação em relação ao uso do modelo chave-fechadura para explicar tal conceito. Tais apontamentos complementam as discussões apresentadas pelas autoras Almeida e Kiill (2019), quando sugerem em sua investigação a ocorrência de um aumento da frequência dos aspectos químicos codificados nos modelos 3D impressos elaborados após a participação de estudantes no processo de modelagem tridimensional.

Ao final desta atividade os estudantes responderam a três questões. A seguir, na tabela 1, são identificadas estas questões e seus respectivos objetivos:

**Tabela 1** – Questões do questionário final e seus respectivos objetivos. Fonte: autoria própria.

Questões	Objetivos
1. Comente sobre sua participação na elaboração dos modelos 3D e relacione com sua aprendizagem sobre o tema.	1. Investigar os fatores que influenciaram a aprendizagem a partir da participação nas atividades de modelagem 3D.
2. Como futuro professor de química, proponha uma atividade que utilize os modelos 3D impressos como um recurso pedagógico.	2. Investigar se os estudantes conseguem propor uma atividade didática que utilize os modelos 3D impressos como um recurso pedagógico.
3. Além da interação enzima-substrato, quais outros conceitos poderiam ser ensinados utilizando este recurso.	3. Investigar se os estudantes conseguem reconhecer outros conceitos que poderiam ser ensinados utilizando a impressão 3D.

O resultado da análise do questionário final possibilitou identificar as possíveis contribuições do uso dos modelos 3D impressos e da modelagem tridimensional, sob duas diferentes perspectivas: da formação docente e da utilização dos modelos 3D impressos como recurso didático.

As categorias de análise foram elaboradas com base nas informações investigadas nas respostas dos estudantes às questões do questionário final. O processo de categorização resultou em três categorias gerais, as quais tem relação com os aspectos de interesse da pesquisa e onze subcategorias de análise, referentes às respostas dos estudantes. Na Tabela 2 apresentamos as categorias e as subcategorias de análise, bem como a frequência de respostas dos estudantes.

**Tabela 2** – Categorias, subcategorias e a frequência absoluta (N) de respostas dos estudantes referentes às questões do questionário final. Fonte: autoria própria.

Categoria	Subcategoria	Frequência de respostas	Total
1. Participação ativa nas atividades de modelagem 3D	1.1 Contribuiu para a percepção dos aspectos químicos da interação enzima-substrato.	E2; E5; E6; E9; E15	5
	1.2 Contribuiu no sentido de pensar os modelos como recurso didático e repensar a interação enzima-substrato.	E1; E13; E14	3
	1.3 Contribuiu no sentido de pensar os modelos como recurso didático que possui limitações.	E4; E7; E10; E11; E12	5
	1.4 Considerou como contribuição a participação na modelagem 3D.	E3; E8	2
2. Proposição de atividades para o uso dos modelos 3D	2.1 Propõe uma atividade e descreve os elementos que serão codificados nas representações.	E1; E3; E5; E12	4
	2.2 Propõe uma atividade de modelagem 3D para ensinar o conceito de geometria molecular.	E6; E10; E11; E14	4
	2.3 Propõe uma atividade de modelagem 3D para ensinar o conceito de modelos atômicos.	E2; E4; E7; E15	4
	2.4 Propõe uma atividade de modelagem 3D para ensinar outros conceitos.	E9; E8; E13	3
3. Descrição de quais outros conceitos poderiam ser ensinados utilizando os modelos 3D	3.1 Descreve dois ou mais conceitos.	E2; E4; E5; E8; E10; E14	6
	3.2 Descreve cinco ou mais conceitos.	E1; E3; E6; E7; E15	5
	3.3 Descreve o uso dos modelos 3D pensando na representação submicroscópica dos conceitos.	E9; E11; E12; E13	4

A partir dos resultados obtidos na categorização foi possível levantar algumas considerações sobre a participação dos estudantes nas atividades de modelagem tridimensional, as quais permitiram evidenciar algumas contribuições para a formação destes licenciandos. Para tais constatações, exemplos de respostas dos estudantes foram utilizadas para ilustrar cada subcategoria evidenciada na tabela 2.

Em relação à participação ativa dos estudantes durante as atividades de modelagem 3D (categoria 1), a maior parte das respostas foram organizadas na subcategoria 1.1, como representado no exemplo de resposta a seguir:

*E6: “Com a elaboração dos modelos 3D, percebi que a interação enzima-substrato pode ocorrer por diversos tipos de interações entre as moléculas e que o sítio ativo é composto por longas cadeias de aminoácidos. Essa interação provocará um rearranjo e formará produtos”.*

Com relação à esta resposta é possível inferir que a participação dos estudantes nas atividades de modelagem 3D pode ter contribuído para a percepção dos aspectos químicos da interação enzima-substrato, no sentido de que a ideia sobre a complexidade da interação enzima-substrato passou a ser considerada.

Ainda considerando a participação dos estudantes nas atividades de modelagem 3D (categoria 1), destacamos que oito estudantes comentaram sobre a sua participação no sentido de pensar os modelos 3D como recurso didático (subcategorias 1.2 e 1.3). Três deles relacionaram o uso dos modelos 3D com a compreensão da interação enzima-substrato, como ilustra o excerto a seguir:

*E1: “Por meio da minha participação, foi notável que o processo de construção realizado contribuiu para esclarecer algumas concepções que eu tinha em relação aos modelos como sendo um recurso. Além disso, esta intervenção permitiu compreender que, na interação enzima-substrato, há todo um mecanismo mais complexo e dinâmico, que antes eu não tinha essa noção”.*

Outros cinco estudantes descreveram a participação na elaboração dos modelos 3D, no sentido de pensar os modelos como recurso didático que possui limitações (subcategoria 1.3 da categoria 1), como apresentado na resposta a seguir:

*E4: “A participação na elaboração dos modelos 3D me possibilitou repensar o uso de modelos como recurso didático, no sentido das suas abrangências e limitações, pois os modelos são representações que podem contribuir no processo de ensino e aprendizagem desde que seja, abordados de modo que suas limitações sejam bem esclarecidas”.*

Nestes padrões de respostas, é possível notar que a participação nas atividades de modelagem tridimensional contribuiu no sentido de possibilitar aos estudantes: (a) repensar o conceito de interação enzima-substrato; (b) repensar os modelos 3D como recurso didático; e (c) reconhecer as limitações deste recurso para o ensino. Levando em consideração esse aspecto analisado, as atividades de modelagem tridimensional podem ter contribuído para a reorganização cognitiva das ideias desses estudantes, ou seja, o novo material, que no caso seria o modelo 3D impresso, pode ter facilitado o estabelecimento de pontes cognitivas com o conhecimento prévio (Moreira & Masini, 2006), favorecendo a compreensão do fenômeno estudado (interação enzima-substrato).

Em uma segunda questão foi solicitado aos estudantes que propusessem uma atividade que utilizasse os modelos 3D elaborados como recurso pedagógico. O objetivo principal deste questionamento foi de investigar se os futuros professores de Química consideraram que os modelos 3D impressos podem ser ou não utilizados para o ensino de outros conceitos científicos (ideia do uso dos modelos 3D impressos em suas futuras práticas de ensino). Com base na análise, foi possível observar que a maioria dos estudantes descreveram uma proposta de atividade de modelagem tridimensional para ensinar o conceito de geometria molecular ou de modelos atômicos (categoria 2). Do total de respostas, quatro eram para o ensino de geometria molecular (subcategoria 2.2), como pode ser observado no excerto a seguir:

*E6: “Pode-se utilizar um modelo 3D impresso como recurso para ensinar geometria molecular. Com os modelos os alunos poderão compreender que as ligações presentes nas moléculas possuem um determinado ângulo e desta forma possibilitará a compreensão de reações químicas e o porquê algumas reações não ocorrem”.*

Outros quatro estudantes relacionaram o uso de modelos 3D impressos ao ensino de modelos atômicos (subcategoria 2.3), como demonstrado no exemplo de resposta a seguir:

E15: *“Para ensinar os diferentes modelos atômicos, os modelos 3D seriam um bom recurso. Pediria aos alunos para desenhar representações de cada modelo, que seriam impressos e discutidos durante as aulas. No final, os alunos desenhariam novamente os modelos que seriam impressos para comparação”.*

Ainda em relação a categoria geral 2, foi possível notar que quatro estudantes propuseram uma atividade para o uso dos modelos 3D e descreveram os elementos codificados nas representações (subcategoria 3.1), como observado na seguinte resposta:

E5: *“Uma atividade que utiliza de modelos 3D impressos, poderia ser sobre ligações químicas, mais precisamente sobre ligações iônicas, no qual por exemplo, os átomos são representados por um cubo; o composto NaCl, os átomos de Na<sup>+</sup> poderiam ser representados por um cubo laranja, o Cl<sup>-</sup> poderia ser representado por um cubo azul, na face desses cubos poderia ter ímãs. A medida que o Cl<sup>-</sup> aproxima-se do íon Na<sup>+</sup> ocorre uma interação eletrostática entre os cubos, formando uma representação de um retículo cristalino”.*

Quanto foi solicitada a descrição de outros conceitos que poderiam ser ensinados utilizando os modelos 3D, a maior parte dos estudantes (N=6) considerou dois ou mais conceitos (subcategoria 3.1), como em:

E4: *“Modelos atômicos, isomeria e interações intermoleculares”.*

Outra amostra de respostas dos estudantes (N=5) consideraram cinco ou mais conceitos (subcategoria 3.2), como por exemplo:

E3: *“Como citado anteriormente é possível ensinar reações químicas, geometria molecular, isômeros, funções orgânicas, em nível de graduação poderia ser trabalhado arranjo cristalino”.*

O restante dos estudantes (N=4) descreveram o uso dos modelos 3D pensando na representação submicroscópica de conceitos (subcategoria 3.3), como apresentado no seguinte excerto:

E11: *“Poderia ser utilizado esse tipo de modelagem para representar como seria uma composição microscópica de um determinado objeto ou de um determinado componente”.*

Quanto à proposição de atividades para o uso dos modelos 3D, classificados na categoria 4, é importante ressaltar que os estudantes apresentaram explicações superficiais, entretanto, reconheceram conceitos que poderiam ser ensinados com o uso dos modelos 3D impressos. Além disso, a maioria dos estudantes consideraram as limitações dos modelos como sendo um aspecto relevante em atividades de modelagem tridimensional.

Desta forma, sugerimos que outras habilidades tenham sido desenvolvidas pelos licenciandos durante as atividades de modelagem tridimensional realizadas nas aulas, tais como a capacidade de saber como, quando e para quem utilizar os modelos no ensino e, ainda, compreenderem como a modelagem tridimensional pode ser utilizada no processo de ensino de determinados conceitos. Justi (2010) descreve sobre estas características como sendo habilidades do Conhecimento Pedagógico do Conteúdo<sup>11</sup> (CPC), as quais são necessárias para a formação pedagógica de professores de Química.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS E AÇÕES FUTURAS**

As etapas da modelagem científica já descritas na literatura (Justi, 2006, 2015) foram adaptadas para o processo de modelagem tridimensional, que podem ser utilizadas por professores e pesquisadores para

<sup>11</sup> Justi (2010) apresenta o CPC como sendo o conhecimento pedagógico prático dos professores necessário para ensinar um conteúdo específico, o qual envolve a relação entre conteúdo e seus aspectos pedagógicos na mente dos professores, por exemplo, a escolha e o uso de um recurso didático eficaz para explicação de um determinado conteúdo ou conceito.

elaboração/criação, expressão, teste e avaliação de modelos 3D impressos. Os dados gerados durante a sequência de atividades de intervenção evidenciam que o processo de construção e a reconstrução dos modelos 3D impressos em particular, efetivamente foram essenciais para a aprendizagem da interação enzima-substrato. Isso no sentido de que novos aspectos químicos (não observáveis) foram considerados pelos estudantes e codificados na segunda versão dos modelos. Além disso, os resultados deste estudo apontam que a ideia da interação enzima-substrato como sendo um processo estático e mecânica foi superada à medida que estes estudantes passaram a notar a dinamicidade do processo, bem como alguns dos aspectos químicos fundamentais a qualquer mecanismo de ação enzimática.

Outro apontamento em relação aos resultados sugere algumas contribuições para formação destes futuros professores de Química, em termos da compreensão da natureza dos modelos na Ciência, ou seja, da aquisição de ideias em relação ao processo de construção de modelos, especialmente as limitações. Nesse sentido, os dados gerados mostram que a maior parte dos licenciandos conseguiu reconhecer as limitações do seu próprio modelo e foram capazes de propor adaptações para minimizar estas limitações. Este fato pode indicar que a participação ativa dos estudantes nas etapas de ensino baseadas na modelagem tridimensional favoreceu discussões e reflexões sobre o uso dos modelos 3D impressos e da modelagem tridimensional em suas futuras práticas de ensino.

Destarte, corroborando com os estudos de Justi (2006, 2015), Mozzer e Justi (2018) e Pérez *et al.* (2018), os dados gerados no presente artigo podem servir de apoio para as futuras pesquisas, cujo objetivo de ensino seja pautado na modelagem tridimensional e o objetivo pedagógico seja a aprendizagem do conceito de interação enzima-substrato ao longo do curso de Licenciatura em Química ou de outros cursos em que a disciplina de Bioquímica esteja prevista no plano curricular. Entretanto, faz-se importante destacar a necessidade da realização de novas pesquisas para investigação das implicações da modelagem tridimensional no ensino de ciências, tendo em vista que este ainda é um assunto pouco discutido em pesquisas brasileiras.

## REFERÊNCIAS

- Abulia, M., Schroeder, L., Garcia, M., Daubenmire, P. L., Wink, D. J., & Clark, G. A. (2016). Connecting protein structure to intermolecular interactions: a computer modeling laboratory. *Journal of Chemical Education*, 93(8), 1353-1363. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00910>
- Almeida, J. F., & Kiill, K. B. (2019). Construção de Modelos 3D impressos como estratégia para a aprendizagem do conceito de interação enzima-substrato. *Revista de Ensino de Bioquímica*, 17(n. esp.), 74-93. Recuperado de <http://bioquimica.org.br/revista/ojs/index.php/REB/article/view/P6/673>
- Barbosa, J. G., & Hess, R. (2010). *O diário de pesquisa: o estudante universitário e seu processo formativo*. Brasília, DF: Liberlivro (Série Pesquisa, 8).
- Bardin, L. (2016). *Análise de conteúdo*. São Paulo, SP: Edições 70.
- Blanco-Anaya, P., Justi, R., & Bustamante, J. D. (2017). Challenges and opportunities in analysing students modelling. *International Journal of Science Education*, 39(3), 377-402. <https://dx.doi.org/10.1080/09500693.2017.1286408>
- Botas, D., & Moreira, D. A. (2013). A utilização de materiais didáticos nas aulas de matemática: um estudo no 1º ciclo. *Revista Portuguesa de Educação*, 26(1), 253-286. Recuperado de <https://revistas.rcaap.pt/rpe/article/view/3259/2633>
- Brown, A. (2015). 3D Printing in Instructional settings: identifying a curricular hierarchy of activities. *Association for Educational Communications and Technology*, 59(5), 16-24. <https://dx.doi.org/10.1007/s11528-015-0887-1>
- Calcabrini, M., & Onna, D. (2019). Exploring the gel state: optical determination of gelation times and transport properties of gels with an inexpensive 3D-printed spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, 96(1), 116-123. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00529>

- Canessa, E. (2013). Low-cost 3D printing for Science, Education and Sustainable Development. In E. Canessa, C. Fonda & M. Zennaro. (Eds.). *Low-cost 3D printing. The abdu salam International centre for Theoretical Physics*. Italy: ICTP. Recuperado de [http://web.archive.org/web/20150407185109/http://sdu.ictp.it/3d/book/Low-cost\\_3D\\_printing\\_screen.pdf](http://web.archive.org/web/20150407185109/http://sdu.ictp.it/3d/book/Low-cost_3D_printing_screen.pdf)
- Carlisle, D., Tyson, J., & Nieswandt, M. (2015). Fostering spatial skill acquisition by general chemistry students. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(3), 478-517. <https://dx.doi.org/10.1039/c4rp00228h>
- Carroll, F. A., & Blauch, D. N. (2017). 3D Printing of molecular models with calculated geometries and p orbital isosurfaces. *Journal of Chemical Education*, 94(7), 886-891. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00933>
- Cataldo, R., Griffith, K. M., & Fogarty, K. H. (2018). Hands-on hybridization: 3D-printed models of hybrid orbitals. *Journal of Chemical Education*, 95(9), 1591-1594. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00078>
- Creswell, J. W. (2014). *Investigação qualitativa e projeto de pesquisa: escolhendo entre cinco abordagens* (3a ed.). São Paulo, SP: Penso.
- Ferreira, C. R., & Arroio, A. (2013). Visualizações no ensino de Química: concepções de professores em formação inicial. *Química Nova na Escola*, 35(3), 199-208. Recuperado de [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc35\\_3/09-PE-32-12.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc35_3/09-PE-32-12.pdf)
- Fourches, D., & Feducia, J. (2019). Student-guided three-dimensional printing activity in large lecture courses: a practical guideline. *Journal of Chemical Education*, 96(2), 291-295. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00346>
- Flick, U. (2009). *Métodos de Pesquisa: Introdução à Pesquisa Qualitativa* (3a ed.). Porto Alegre, RS: Artmed.
- Galembeck, E., & Filho, C. E. S. P. (2007). *Enzyme*. Biblioteca Digital de Ciências. Recuperado de <https://www.bdc.ib.unicamp.br/bdc/visualizarMaterial.php?idMaterial=528>
- Galembeck, E., Filho, C. E. S. P., & Torres, B. B. (2007). *A cinética da reação enzimática*. Biblioteca Digital de Ciências. Recuperado de <https://www.bdc.ib.unicamp.br/bdc/visualizarMaterial.php?idMaterial=527>
- Gerhardt, T. E., & Silveira, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre RS: Ufrgs. Recuperado de <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>
- Gilbert, J. K. (2004). Models and Modelling: routes to more authentic Science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130. <https://dx.doi.org/10.1007/s10763-004-3186-4>
- Gilbert, J. K. (2013). Representations and models: aspects of Scientific literacy. In R. Tytler, P. Hubber, & B. Waldrip (Eds.). *Constructing representations to learn in Science* (193-198). Rotterdam, Netherlands: Sense Publishers. <https://dx.doi.org/10.1007/978-94-6209-203-7>
- Gilbert, J. K. (2010). The role of visual representations in the learning and teaching of science: an introduction. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 11(1), 1-19. Recuperado de [https://www.eduhk.hk/apfslt/download/v11\\_issue1\\_files/foreword.pdf](https://www.eduhk.hk/apfslt/download/v11_issue1_files/foreword.pdf)
- Gilbert, J. K. (2005). Visualization: a metacognitive skill in Science Education. In J. K. Gilbert (Ed.). *Visualization in Science Education* (9-27). Dordrecht, Netherlands: Springer. [https://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3613-2\\_2](https://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3613-2_2)
- Gilbert, J. K., & Treagust. (2009). Multiple representations in Chemical Education. *International Journal of Science Education*, 31(16), 2271-2273. <https://dx.doi.org/10.1080/09500690903211393>
- Griffith, K. M., Cataldo, R., & Fogarty, K. H. (2016). Do-it-yourself: 3D models of hydrogenic orbitals through 3D printing. *Journal of Chemical Education*, 93(9), 1586-1590. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00293>

- Grosso, L. A., & Martins, M. F. (2006). *Introdução à Pesquisa em Educação*. São Paulo, SP: Biscailchin.
- Jager, T. (2016). Perceived advantages of 3D lessons in constructive learning for South African student teachers encountering learning barriers. *International Journal of Inclusive Education*, 21(1), 90-102. <https://dx.doi.org/10.1080/13603116.2016.1184329>
- Jiménez-Tenorio, N., Núñez, L. A., & Martínez, J. M. O. (2016). Percepciones de estudiantes para maestros de educación primaria sobre los modelos analógicos como recurso didáctico. *Enseñanza de Las Ciencias*, 34(3), 91-112. Recuperado de [https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc\\_a2016v34n3/edlc\\_a2016v34n3p91.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc_a2016v34n3/edlc_a2016v34n3p91.pdf)
- Johnson-Laird, P. N. (1980). Mental Models in Cognitive Science. *Cognitive Science*, 4(1), 71-115. [https://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog0401\\_4](https://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog0401_4)
- Justi, R. (2006). La enseñanza de ciencias basada em la elaboración de modelos. *Enseñanza de Las Ciencias*, 24(2), 173-184. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/13271794.pdf>
- Justi, R. (2010). Modelos e Modelagem no Ensino de Química. In Santos, W. L. P., & Maldaner, O. A. *Ensino de Química em Foco* (209-230). Ijuí, RS: Unijui.
- Justi, R. (2015). Relações entre argumentação e modelagem no contexto da ciência e do ensino de ciências. *Revista Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, Belo Horizonte, 17(n. esp.), 31-48. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/epcc/v17nspe/1983-2117-epcc-17-0s-00031.pdf>
- Justi, R., & Gilbert, J. K. (2003). Teachers' views on the nature of models. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1369-1386. <https://dx.doi.org/10.1080/0950069032000070324>
- Kaliakin, D. S., Zaari, R. R., & Varganov. (2015). 3D Printed potential and free energy surfaces for teaching fundamental concepts in Physical Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 92(12), 2106-2112. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00409>
- Kondinski, A., & Parac-Vogt, T. N. (2019). Programmable interlocking disks: bottom-up modular assembly of chemically relevant polyhedral and reticular structural models. *Journal of Chemical Education*, 1(1), A-D. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00769>
- Krell, M., Belzen, A. U. Z., & Krüger, D. (2014). Students' levels of understanding models and modelling. *Research in Science Education*, 44(1), 109-132. <https://dx.doi.org/10.1007/s11165-013-9365-y>
- Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y., & Wu, H.-K. (2015). Students' views of scientific models and modeling: do representational characteristics of models and students' educational levels matter?. *Research in Science Education*, 47(2), 305-328. <https://dx.doi.org/10.1007/s11165-015-9502-x>
- Linenberger, K. J., & Bretz, S. L. (2015). Biochemistry students' ideas about how an enzyme interacts with a substrate. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 43(4), 213-222. Recuperado de <https://iubmb.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bmb.20868>
- Linenberger, K. J., & Bretz, S. L. (2014). Biochemistry students' ideas about shape and charge in enzyme-substrate interactions. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 42(4), 366-367. Recuperado de <https://iubmb.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bmb.20776>
- Marzzoco, A., & Torres, B. B. (2007). *Bioquímica básica* (3a ed.). Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan,
- Meyer, S. C. (2015). 3D Printing of protein models in an undergraduate laboratory: leucine zippers. *Journal of Chemical Education*, 92(12), 2120-2125. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00207>
- Minayo, M. C. S., Deslandes, S. F., & Gomes, R. (2009). *Pesquisa Social: teoria, método e criatividade* (28a ed.). Rio de Janeiro, RJ: Vozes.
- Moreira, M. A. (2011). *Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares*. São Paulo, SP: Livraria da Física.
- Moreira, M. A., & Masini, E. F. S. (2006). *Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo, SP: Centauro. <https://dx.doi.org/10.5335/rep.v25i2.8180>

- Mozzer, N. B., & Justi, R. (2018). Modelagem analógica no Ensino de Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 23(1), 155-182. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/883/pdf>
- Muñoz-Campos, V., Franco-Mariscal, A. J., & Branco-López, Á. (2018). Modelos mentales de estudiantes de educación secundaria sobre la transformación de la leche em yogur. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15(2), 2106. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2018.v15.i2.2106](http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2018.v15.i2.2106)
- Muri, E. M. F. (2014). Proteases virais: importantes alvos terapêuticos de compostos peptidomiméticos. *Química Nova*, 37(2), 308-316. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/qn/v37n2/v37n2a19.pdf>
- Ornek, F. (2008). Models in Science Education: applications of models in learning and teaching Science. *International Journal of Environmental & Science Education*, 3(2), 35-45. Recuperado de <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ894843.pdf>
- Paganini, P., Justi, R., & Mozzer, N. B. (2014). Mediadores na coconstrução do conhecimento de ciências em atividades de modelagem. *Ciência e Educação (Bauru)*, 20(4), 1019-1036. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v20n4/1516-7313-ciedu-20-04-1019.pdf>
- Pérez, G. M., Galindo, A. A. G., & Galli, L. G. (2018). Enseñanza de la evolución: fundamentos para el diseño de una propuesta didáctica basada em la modelización y la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15(2), 2102. Recuperado de <https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/3625/3872>
- Prain, V., & Ttler, R. (2012). Learning through constructing representations in Science: a framework of representational construction affordances. *International Journal of Science Education*, 34(17), 2751-2773. <https://dx.doi.org/10.1080/09500693.2011.626462>
- Sabake, N. J., Marson, G. A., & Torres, B. B. (2006). *Estudo interativo da estrutura e função de proteínas*. Biblioteca Digital de Ciências. Recuperado de <https://www.bdc.ib.unicamp.br/bdc/visualizarMaterial.php?idMaterial=247>
- Sangiogo, F. A., & Zanon, L. B. (2012). Reflexões sobre modelos e representações na formação de professores com foco na compreensão conceitual da catálise enzimática. *Química Nova na Escola*, 34(1), 26-34. Recuperado de [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34\\_1/06-CCD-09-11.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34_1/06-CCD-09-11.pdf)
- Scalfani, V. F., & Vaid, T. P. (2014). 3D Printed molecules and extended solid models for teaching symmetry and point groups. *Journal of Chemical Education*, 91(8), 1174-1180. <https://dx.doi.org/10.1021/ed400887t>
- Smiar, K., & Mendez, J. D. (2016). Creating and using interactive, 3D-printed models to improve student comprehension of the bohr model of the atom, bond polarity, and hybridization. *Journal of Chemical Education*, 93(9), 1591-1594. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00297>
- Souza, K. A. F. D., & Cardoso, A. A. (2008). Aspectos macro e microscópicos do conceito de equilíbrio químico e de sua abordagem em sala de aula. *Química Nova na Escola*, 27(1), 51-56. Recuperado de <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc27/08-peq-3106.pdf>
- Souza, V. C. A., & Justi, R. (2010). Estudo da utilização de modelagem como estratégia para fundamentar uma proposta de ensino relacionada à energia envolvida nas transformações químicas. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 10(2), 1-26. Recuperado de <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/download/3978/2542>
- Souza, V. C. A., & Justi, R. (2011). Interlocuções possíveis entre linguagem e apropriação de conceitos científicos na perspectiva de uma estratégia de modelagem para a energia envolvida nas transformações químicas. *Revista Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, Belo Horizonte, 13(2), 31-46. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/epec/v13n2/1983-2117-epec-13-02-00031.pdf>
- Szymanski, H., Almeida, I. R., & Prandini, R. C. A. R. (2004). *A entrevista na pesquisa em Educação: a prática reflexiva* (61a ed). Brasília, DF: Liberlivro. (Série Pesquisa em Educação, 4).
- Taber, K. S. (2013). Modelling learners and Science Education: developing representations of concepts, conceptual structure and conceptual change to inform teaching and research. In Taber, K. S. *Modelling the*

*Science learner's knowledge*. New York, United States of America: Springer. <https://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7648-7>

Vasconcelos, F. C. G. C., & Arroio, A. (2013). Explorando as percepções de professores em serviço sobre as visualizações no ensino de química. *Química Nova*, 36(8), 1242-1247. Recuperado de [http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol36No8\\_1242\\_24-ED12968.pdf](http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol36No8_1242_24-ED12968.pdf)

Vaz, M., & Choupina, A. (2012). Lipases: biocatalizadores da hidrólise de triacilgliceróis. *Revista Eletrônica de Biologia*, 5(3), 42-58. Recuperado de <https://revistas.pucsp.br/reb/article/view/5791/11635>

**Recebido em:** 25.02.2019

**Aceito em:** 08.10.2019