

Um modelo epistemológico de referência integrando Cálculo e Cinética Química

Resumo:

Este trabalho apresenta um enfoque matemático para a compreensão da cinética de reações químicas, com ênfase no uso do Cálculo Diferencial e Integral na formulação e resolução de problemas. Aborda-se a modelagem matemática das leis de velocidade e a aplicação de equações diferenciais ordinárias na determinação da ordem reação e da constante cinética. São exploradas técnicas de diferenciação e integração, bem como métodos numéricos para ajuste de dados experimentais, como o método dos mínimos quadrados. O estudo propõe um percurso de ensino baseado em tarefas/praxeologias que integram conceitos matemáticos e químicos, promovendo uma abordagem interdisciplinar na formação de professores.

Palavras-chaves: Modelagem. Praxeologias. Cinética. Cálculo Diferencial e Integral.

1 Introdução

A linguagem matemática desempenha um papel fundamental na construção dos conceitos que nos ajudam a entender fenômenos químicos, especialmente na modelagem em Cinética de Reações. Esses conceitos ganham significado pelo uso de equações diferenciais ordinárias (EDOs).

Este estudo empírico foi conduzido na Universidade Estadual de Feira de Santana, no âmbito do projeto *Formação para prática interdisciplinar docente: construção de tarefas por mediação tecnológica e conteúdos para web no ensino de matemática e química*. A formação foi realizada na disciplina Fundamentos de Físico-Química, com foco no tópico Cinética Química (CQ), no curso de Licenciatura em Química. A investigação fundamenta-se na aplicação do Cálculo Diferencial e Integral (CDI) para compreender os fenômenos cinéticos, utilizando um percurso de ensino fundamentado em modelagem matemática (Borba; Silva, 2011). Esta modelagem é compreendida como uma prática social e interdisciplinar, contextualizada, colaborativa, e integrada ao uso de tecnologias digitais, não apenas como uma aplicação técnica da Matemática.

Geciara da Silva Carvalho


Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana, BA – Brasil

 <https://orcid.org/0000-0002-0474-5558>

 geciara@uefs.br

José Vieira do Nascimento Júnior

Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana, BA – Brasil

 <https://orcid.org/0000-0001-5220-7984>

 jvnjunior@hotmail.com

Recebido • 04/04/2025

Aprovado • 05/06/2025

Publicado • 08/08/2025

Comunicação Científica

O objetivo deste estudo foi demonstrar a importância do CDI para a Cinética Química, enfatizando seu aspecto formal, aliado à aplicação de métodos computacionais no tratamento de dados experimentais. Para isso, propomos no percurso uma integração com as TICs e técnicas algébricas e gráficas.

Diante disso, justificamos nossa opção por estruturar a proposta investigativa a partir de um percurso de estudos e pesquisa (PEP), no âmbito da TAD, formulada por Chevallard (2020). O PEP permite transformar a sala de aula em um espaço investigativo, no qual os alunos se articulam em torno de uma questão geradora, que é científica e genérica, gerando inúmeras questões derivadas, cujas respostas levam à questão inicial. Outra característica de um PEP é o seu caráter interdisciplinar e extraescolar (do cotidiano). Essa abordagem se origina de um Modelo Epistemológico de Referência, o qual poderá permitir que os alunos reconstruam os saberes escolares por meio da problematização, da pesquisa e da conexão entre os conteúdos da Cinética Química e da Matemática – especialmente no que tange às Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) e à modelagem de fenômenos químicos. O uso do PEP ancora-se, ainda, nos princípios da Educação Matemática Crítica, por favorecer a construção de significados em contextos cultural e socialmente relevantes.

2 Marco teórico

Segundo Chevallard (2020), o Modelo Epistemológico Dominante (MED) corresponde à maneira como os saberes são tradicionalmente organizados e legitimados na escola, frequentemente de forma linear e descontextualizada. Já o Modelo Epistemológico de Referência (MER) representa uma tentativa de reconstrução do saber escolar de modo mais articulado às práticas sociais de referência, respeitando sua complexidade e contextualização. Ele é construído a partir das análises que o professor realiza em torno do MED.

Por outro lado, as organizações didáticas propostas pela TAD se dão na forma dos percursos de estudos e pesquisa (PEP), desencadeado por uma questão geradora de natureza científica Q_0 . Essa organização é precedida da concepção de um MER, proposto pelo professor. Outra noção central na análises à luz da TAD é a de praxeologia, que será melhor esclarecida adiante.

No âmbito da TAD, os saberes escolares são compreendidos como praxeologias – compostas por tarefas, técnicas, tecnologias e teorias – que circulam em instituições específicas (Chevallard, 2020). A análise didática se debruça sobre a transposição desses saberes e os conflitos que emergem nesse processo, incluindo os chamados obstáculos epistemológicos, que são concepções prévias e espontâneas que dificultam a aprendizagem de novos conhecimentos científicos (Bachelard, 1996).

A TAD fornece as ferramentas necessárias para as análises das relações entre sujeito e objetos do saber através de modelos praxeológicos que se aplica perfeitamente na construção de objetos pelo sujeito. Isso pode se dar em torno de práticas que envolvem os saberes em CDI e CQ na formulação de problemas pelo professor e sua resolução pelos estudantes. Já a análise praxeológica nos permite compreender como o conhecimento é institucionalmente organizado e como as

praxeologias emergem no processo de ensino e aprendizagem, se estruturando em torno do quarteto praxeológico, manifestado por tarefas, técnicas, tecnologias e teorias, formalmente $\wp = [T, \tau, \theta, \Theta]$ (Chevallard, 2020). Essa análise nos permite definir uma variável didática interesse na pesquisa que é a relação $R(x, \wp)$, entre sujeito (x) e objeto ou praxeologia (\wp), através da análise comparativa entre a resposta dada pelo sujeito e aquela esperada institucionalmente, tida como de referência R^\heartsuit .

Nessa perspectiva, a formulação e execução de tarefas em torno da modelagem cinético – matemática desempenha um papel central a compreensão de como os estudantes compreendem os fenômenos envolvidos na transformação de reagentes em produtos. A descrição de como varia a concentração das espécies químicas mediada por EDOs nos permite entender esse fenômeno químico. Aprender construir essas equações que regem leis cinéticas, requer o domínio de técnicas de diferenciação e integração. Nessa construção, o estudante desenvolve a habilidade interpretar os dados experimentais: volume, temperatura e pressão, e a determinar formalmente parâmetros cinéticos: constante de velocidade, ordem de reação e energia de ativação.

Visto isso, propusemos dois modelos epistemológicos que orientam o ensino da CQ: o MED e o MER (Barquero *et al.*, 2011). O primeiro se caracteriza pela fragmentação entre os saberes matemáticos e químicos no ensino da CQ. Nesse modelo, a Matemática é frequentemente ensinada de forma abstrata e desarticulada da Química, o que dificulta sua aplicação na interpretação de fenômenos químicos.

A separação entre as disciplinas cria obstáculos epistemológicos que comprometem a compreensão integrada dos conceitos. No âmbito institucional, o MED é sustentado por documentos oficiais como a BNCC (Brasil, 2017) e o livro didático, que influenciam na relação professor-conhecimento-aluno. Na BNCC, se recomenda ensinar a Cinética de Reações no Ensino Médio (EM), exigindo do aluno desenvolver habilidades como dominar conceitos básicos em cinética e o usar representações algébricas e gráficas na resolução de tarefas. Contudo, aplicar essas recomendações ainda é um desafio pois o ensino da matemática e química no EM também é desarticulado.

Embora o CDI seja fundamental para compreender a variação de grandezas ao longo do tempo, frequentemente ele é ensinado sem a devida contextualização com a química. Isso resulta em um ensino com a qual a matematização necessária é tratada como mero "aplicacionismo", ou seja, uma aplicação superficial e descolada da prática experimental. Além disso, o MED mantém a Matemática como um campo "puro", distante das ciências experimentais (Barquero *et al.*, 2011), perpetuando uma lógica dedutivista e atrasando a aplicação das ferramentas matemáticas em outras áreas.

Tradicionalmente, a modelagem matemática da cinética química se baseia na equação geral da taxa de variação da concentração dos reagentes e produtos (Connors, 1990). Consideremos uma reação em que a substância A se decompõe em B e C, equação (1):



A velocidade de reação (v) pode ser definida empiricamente pela taxa de variação da concentração do reagente, C_A , no tempo:

$$v = -\frac{dC_A}{dt}. \quad (2)$$

Igualando a equação (2) com a forma exponencial da lei cinética,

$$v = kC_A^n \quad (3)$$

temos,

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \Leftrightarrow \frac{dC_A}{C_A^n} = -kdt, \quad (4)$$

em que k é a constante cinética, ou velocidade específica, e n é a ordem da reação com relação ao reagente A .

A partir de dados empíricos esta equação diferencial pode ser resolvida por separação de variáveis ou por integração direta, dependendo da ordem da reação, o que leva à determinação da velocidade específica da reação.

2.1 Técnicas de Solução das Equações Diferenciais na Cinética Química.

Uma reação de primeira ordem tem a forma

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A. \quad (5)$$

Separando variáveis e integrando,

$$\int \frac{dC_A}{C_A} = -k \int dt$$

obtém-se a equação integrada

$$C_A = c_{A,0} e^{-kt}, \quad (6)$$

em que $c_{A,0}$ é a concentração inicial do reagente A , portanto, uma constante.

Para uma reação de n – ésima ordem, com $n \neq 1$ a equação integrada é

$$\left(\frac{C_A}{C_{A,0}}\right)^{-n+1} = 1 + C_{A,0}^{n-1}(n-1)kt. \quad (7)$$

Os dados experimentais nos permitem decidir a respeito do regime cinético pelo valor de n mediante análise gráfica segundo as variáveis concentração e tempo. Isso se faz pelo ajuste de pontos que represente a melhor reta, tendo como a referência o coeficiente de regressão linear mais próximo de 1, segundo o método dos mínimos quadrados. Isso decorre do fato de que experimentalmente os dados experimentais nem sempre seguem um padrão ideal, podendo apresentar dispersão de pontos, o que exige ajuste e análise cuidadosa dos dados. É importante destacar que a técnica de linearização requer atenção, pois intervalos de tempo de reação muito curtos podem gerar erros na identificação da ordem da reação, especialmente entre ordens zero e um (Ball, 2005). Trata-se de uma operação matemática que pode ser complexa, mesmo para estudantes em fase avançada da graduação.

2.2 Ajuste de Dados Experimentais e Método dos Mínimos Quadrados

Em experimentos, os dados obtidos raramente se ajustam perfeitamente às equações teóricas. O método dos mínimos quadrados é uma técnica numérica amplamente utilizada para ajustar curvas

experimentais às equações matemáticas. Dado um conjunto de pontos, o erro quadrático total é minimizado resolvendo

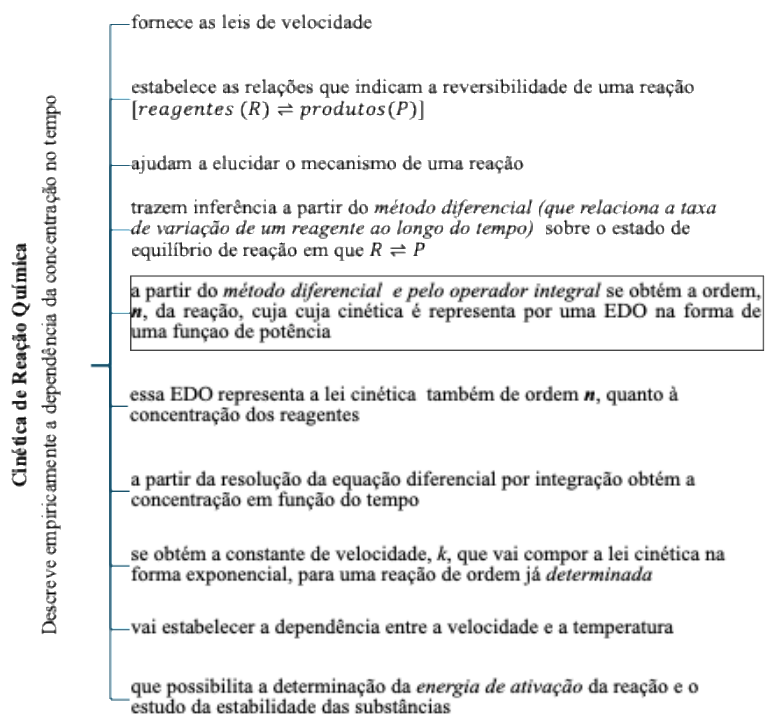
$$S = \sum [y_i - f(x_i)]^2, \quad (8)$$

em que S é a soma dos quadrados dos resíduos – desvios verticais de cada ponto da linha reta, contendo os dados experimentais – em que y_i e x_i são pares individuais de dados, cujo model de regressão linear é representado como $y = mx + b$ (Skoog *et al*, 2010, pp. 182-183). A aplicação desse método no Excel ou outros *softwares* como *MATLAB* e *Python* facilita a determinação de parâmetros cinéticos. Nesta perspectiva, este estudo propõe um ensino interdisciplinar da Cinética Química baseado na modelagem matemática, com o apoio do Excel, superando uma das limitações do MED pela integração entre Matemática, Química e Informática na construção conceitos em Cinética.

3 Modelos epistemológicos em cinética química

O modelo epistemológico de referência estrutura um PEP que integra conhecimentos matemáticos e químicos, permitindo que a modelagem matemática seja utilizada para resolver problemas cinéticos, de acordo com o MED. O Figura 1 sintetiza os conceitos fundamentais que compõem o MER.

Figura 1 – A Cinética de reação química.

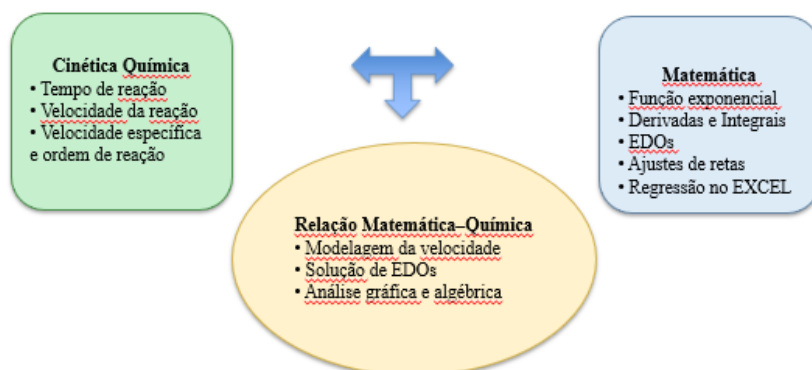


Fonte: Nascimento Júnior e Carvalho (2024).

Na sequência apresentamos um mapa de conteúdos na Figura 2. Ela evidencia as inter-relações entre conceitos da Cinética Química e ferramentas do Cálculo mobilizadas no MER. Este

mapa oferece uma síntese visual das articulações propostas no percurso interdisciplinar, destacando a integração entre taxa de variação, EDOs e métodos gráficos e numéricos.

Figura 2 - Relações presentes no MER entre conteúdos de Cinética Química e Cálculo.



Fonte: Nascimento Júnior e Carvalho (2024).

O MER articula praxeologias voltadas à compreensão da Cinética destacando a relação entre taxas de variação, equações diferenciais e métodos numéricos, como o ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados.

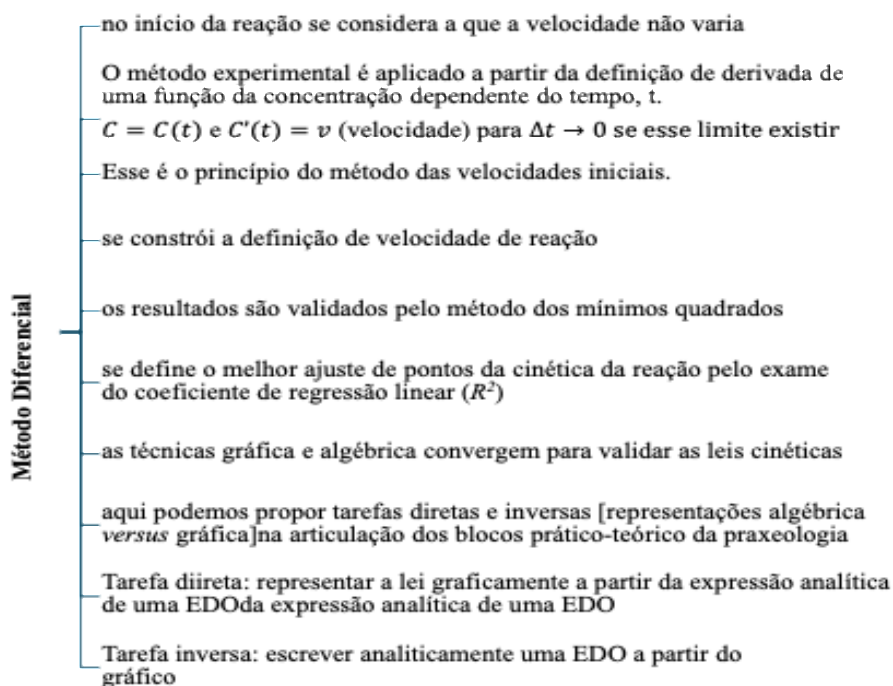
Em torno do *método diferencial* (conceito central) organizamos o segundo mapa conceitual, *vide* Figura 3 (Leithold, 1994). A determinação da velocidade no início da reação é a base empírica da aplicação deste método, se considera que a velocidade não quando $\Delta t \rightarrow 0$. Experimentalmente, o método é aplicado a partir da definição de derivada de uma função da concentração, $C(t)$, dependente do tempo, t

$$C = C(t) \text{ e } C'(t) = v \text{ (velocidade) para } \Delta t \rightarrow 0$$

$$v = C'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{C(t + \Delta t) - C(t)}{\Delta t}.$$

Se esse limite existir, $C'(t) \rightarrow \infty$ no início da reação, entretanto, a concentração se mantém constante nessas condições. Esta é a síntese do método das velocidades iniciais mostrado na Figura 3. A proposta deste MER é construir e aplicar um percurso de ensino que promova a interdisciplinaridade aliada a recursos digitais (*webbing*) (Trouche; Drijvers, 2015).

Figura 3 – Mapa Conceitual.



Fonte: Nascimento Júnior e Carvalho (2024).

Essa abordagem visa contribuir para a formação de professores e para o desenvolvimento de conceitos fundamentais na Cinética Química. Essa hipótese foi testada no PEP aqui descrito, que inclui como objetivo principal organizar e analisar o ensino de química em torno de praxeologias. Portanto, o objetivo geral desse percurso foi formar professores capazes de ensinar Cinética Química articulada ao Cálculo, utilizando ferramentas digitais para apoiar a aprendizagem. Esse futuro professor deverá estar apto a elaborar situações-problema, conectando técnicas matemáticas à interpretação dos fenômenos químicos.

A partir da pergunta inicial Q_0 : "Como a pureza de um material varia com o tempo?", o percurso se organizou em torno de três questões principais: (1) Como estudar as leis cinéticas e suas equações? (2) Como analisar graficamente os dados experimentais? (3) Como integrar recursos digitais, como simulações e softwares, no tratamento desses dados? A resolução dessas questões envolve a mobilização de conceitos de velocidade de reação, ordem de reação, constante cinética, além de práticas como a construção de gráficos e o uso de *softwares* como *Excel* e *titrAB*¹ para simulação e análise de dados, promovendo uma formação que integra teoria e prática.

4 Desenvolvimento da pesquisa e resultados

¹ É um simulador interativo que permite realizar experiências de titulação virtualmente, sem necessidade de um laboratório físico. Ele mostra a curva de titulação, o comportamento do pH e permite explorar o papel dos ácidos e bases fortes ou fracos em diferentes cenários.

Esta pesquisa qualitativa é um recorte de uma investigação iniciada em março de 2019 e prevista para finalizar em fevereiro de 2023, no Departamento de Ciências Exatas da UEFS. O recorte aqui apresentado corresponde a um semestre letivo, de fevereiro a julho de 2021, com carga de 60 horas, em aulas teórico-práticas de quatro horas cada. Participaram sete futuros professores de Química. As atividades ocorreram de forma remota, via plataformas *Google* e *Schoology*, devido à continuidade da pandemia de Covid-19.

As análises didáticas foram baseadas nos dados gerados durante o percurso formativo, estruturadas em torno de praxeologias e análises de erros, conforme a teoria que melhor explicasse os fenômenos observados. O percurso incluiu práticas com recursos digitais, como simulação de titulação, tratamento de dados, construção de tabelas e determinação de parâmetros cinéticos por linearização de pontos, utilizando computador, acesso à *internet*, *Office 2019*, *data-show* e o *software titrAB*². Em caso de retorno presencial, estavam previstas atividades experimentais com vidrarias, potenciômetro de pH e reagentes químicos (CH_3COOH e NaOH), ampliando o uso dos materiais do *milieu*³ para práticas laboratoriais complementares.

A implantação do Percurso de Estudo e Pesquisa (PEP) foi estruturada em três momentos didáticos principais: encontro com o objeto de estudo, exploração das tarefas e técnicas e elaboração do discurso teórico, promovendo a articulação entre o saber e o saber-fazer.

1º Momento – Encontro com o Objeto

O percurso começou com um encontro online, em que se abordou a origem e os conceitos fundamentais da Cinética Química, destacando sua relação com a Física. Para iniciar a reflexão, o professor propôs a tarefa t_1 , pedindo aos estudantes que formulassem perguntas sobre fenômenos naturais com caráter cinético. As respostas surgiram em forma de perguntas, como:

- r_1 : Quanto de hidrogênio se transforma em hélio por segundo no Sol?
- r_2 : Quanto de matéria se processa a cada segundo no Sol?

Essas respostas permitiram construir modelos matemáticos simples, baseados em funções de uma variável, introduzindo a ideia de modelagem matemática aplicada à cinética.

A partir daí, foi proposta a questão geradora "Como a pureza de um material varia no tempo?" Essa pergunta norteou o percurso e abriu caminho para a formulação de questões mais específicas, como Q_1 , que tratava da determinação do prazo de validade de um medicamento com base em dados cinéticos (estabilidade do Paracetamol). O objetivo dessa etapa foi estimular a formulação de perguntas científicas e desenvolver habilidades praxeológicas nos estudantes.

2º Momento – Exploração das Tarefas e Técnicas

² *titrAB.fr*. Simulador de titulação ácido-base [programa de computador]. Versão 1.0. França: *Académie d'Aix-Marseille*, 2015. Disponível em: <http://www.ac-aix-marseille.fr>. Acesso em: 21 mar. 2025.

³ O conceito de *milieu* é fundamental na TAD pois descreve o ambiente interativo no qual a aprendizagem acontece. Para Chevallard (1999), o *milieu* não é apenas o espaço físico, mas inclui os materiais, os sujeitos, as normas e as práticas que estruturam o processo de ensino-aprendizagem. Segundo Barquero et al. (2011), o *milieu* na Educação Matemática é compreendido como um espaço dinâmico, com o qual ocorre uma interatividade contínua entre o sujeito e o ambiente, o que facilita a construção de sentidos matemáticos e a resolução de problemas. Esta perspectiva é essencial na modelagem matemática, pois o ambiente é visto como um "campo de ação" que oferece possibilidades de resolução, enquanto o estudante se apropria de conhecimentos e ferramentas matemáticas para modelar e resolver problemas.

Neste momento, os estudantes realizaram diversas tarefas experimentais e analíticas, utilizando recursos como Excel e o simulador *titrAB.fr*. As atividades incluíram:

- Determinar a energia de ativação de uma reação com base em dados experimentais e gráficos de $\ln(k)$ vs. $1/T$.
- Construir curvas de titulação ácido-base em ambientes virtuais e compará-las com gráficos obtidos no Excel.
- Representar graficamente o modelo de adsorção de ácido acético em carvão ativado.

Foram aplicadas diferentes técnicas para as mesmas tarefas, permitindo aos estudantes compararem métodos e desenvolver um entendimento mais aprofundado das relações entre teoria e prática.

3º Momento – Elaboração do Discurso Teórico

No terceiro momento, os estudantes sistematizaram os conhecimentos construídos, elaborando protocolos experimentais e relatórios que articularam os blocos técnicos (tarefas e técnicas) e teóricos (conceitos e explicações). Por exemplo, ao realizar a tarefa t_c , que consistia em simular uma titulação no *titrAB.fr*, os estudantes mobilizaram conceitos de neutralização ácido-base, ponto de equivalência e cálculos de concentração, articulando-os às técnicas de simulação e de análise gráfica no Excel.

Essa articulação entre prática e teoria mostrou-se eficaz, com 85,6% dos estudantes evidenciando a compreensão dos conceitos fundamentais da Cinética Química nos relatórios finais. A proposta favoreceu o desenvolvimento de praxeologias que integraram técnicas matemáticas e conhecimentos químicos, promovendo a autonomia investigativa dos futuros professores. A busca da resposta à questão geradora do PEP

Na busca de R^\heartsuit formulamos mais questões derivadas além de q_1 ; elaboramos q_2 , $q_{1,1}$, $q_{1,2}$, *etc.* No quadro 1 se encontram as praxeologias provisórias, R^\diamond , colocadas por estudantes. Essa construção coletiva nos ajudou na construção de tarefas cujas respostas serviram de elementos de análise e reflexão teórica acerca da evolução do universo objetual dos estudantes ao longo do semestre. A partir dos dados do Quadro 1, é possível construir um mapa de perguntas e respostas [Q-A/map em inglês], obtido a partir dos dados do percurso.

Quadro 1: Mapa de perguntas e respostas.

<p>$q_{1,1}$: como se define e determina a ordem (n) da reação de decomposição do Paracetamol?</p> <p>$q_{1,2}$: qual é o significado físico da constante de velocidade (k)?</p> <p>q_2: como é possível determinar a constante de velocidade da reação?</p> <p>$q_{2,1}$: como posso determinar o prazo de validade desse medicamento t_{90}, em meses, a partir dos valores de k e n?</p>
--

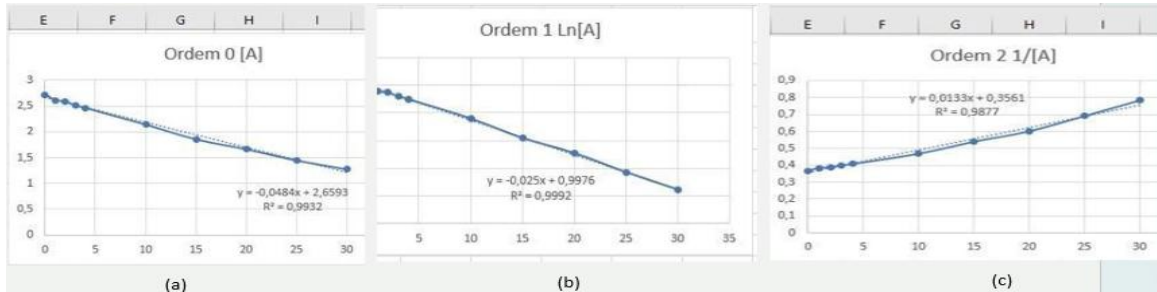
Fonte: Nascimento Júnior. e Carvalho (2024).

O caminho para encontrar a resposta a Q_1 passou pela linearização dos pontos da Figura 4 no plano da concentração molar do reagente [Paracetamol] *versus* tempo em segundos. Os pontos foram processados no software Excel.

Segundo a ordem de reação da EDO integrada, projetamos três possibilidades de ordem [$n = 0, 1$ ou 2], de acordo com a Figura 1. A curva que apresentou o melhor ajuste de pontos, isto é, o

coeficiente de regressão linear [$R^2 = 0,9992$] o mais próximo de 1, que corresponde a uma EDO de 1ª ordem, se a ordem de reação, $n = 1$. A representação gráfica, obtida com o auxílio do aplicativo Excel, na Figura 4, segue.

Figura 4 – Resposta dos Estudantes a Q_1 : representação gráfica de EDO de ordem 0,1 e 2, respectivamente.



Fonte: Nascimento Júnior e Carvalho (2024).

Uma das aplicações das EDO que merece destaque é da questão derivada Q_1 a respeito da reação de decomposição de um medicamento até atingir o seu prazo de validade. A respeito dela, a unanimidade dos estudantes concluiu, corretamente, que a lei de velocidade que melhor se ajusta aos pontos é de 1ª ordem. Assim a resposta a Q_1 fica

$$\ln\left(\frac{C_A}{C_{A,0}}\right) = -kt \Leftrightarrow \ln C_A - \ln C_{A,0} = -kt_{0,9}.$$

Substituindo para $t_{0,9}$, vem

$$\ln 0,9 - \ln 1 = -0,025t_{0,9} \Rightarrow t = \frac{-(0,105 + 0)}{-0,025} = 4,21 \text{ meses.}$$

4,21 meses como prazo de validade do medicamento, em que a constante cinética $k = 0,025s^{-1}$ é fornecida diretamente pelo Excel.

Os elementos algébricos e gráficos nessa praxeologia nos revelam que a resposta esperada foi alcançada. Isso denota que a relação entre o sujeito (x) e o objeto (o) não é vazia, $R(x, o) \neq \emptyset$, o que pode ser indício de que as praxeologias pessoais foram modificadas no sentido da ampliação do conhecimento do sujeito diante do objeto, dentro das condições e restrições presentes na instituição.

5 Considerações finais

O presente estudo evidenciou a importância da modelagem matemática na compreensão e no ensino da Cinética de Reações Químicas. A integração do Cálculo Diferencial e Integral com os conteúdos da Química, promovida por um PEP, contribuiu para superar a fragmentação típica do MED caracterizado pela separação entre saberes matemáticos e químicos.

Os resultados obtidos ao longo da aplicação do PEP indicam que a articulação entre as praxeologias matemáticas e químicas permitiram aos futuros professores não apenas desenvolver habilidades técnicas específicas, como a resolução de equações diferenciais e o ajuste de dados experimentais, mas também ampliar sua compreensão teórica sobre os fenômenos cinéticos. A proposta metodológica baseada na TAD mostrou-se eficiente para promover a reflexão crítica dos

estudantes acerca de suas práticas e para fomentar a construção de um equipamento praxeológico adequado às necessidades da docência em Ciências da Natureza.

A utilização de ferramentas digitais, como o *titrAB.fr* e o *Excel*, além da análise gráfica e algébrica dos dados experimentais, facilitou a visualização dos conceitos de ordem de reação, constante cinética e energia de ativação, aproximando teoria e prática em um ambiente de aprendizagem híbrido e contextualizado.

Diante dos desafios impostos pelo ensino remoto e pelas restrições da pandemia, a experiência demonstrou a viabilidade de um ensino interdisciplinar e inovador, fundamentado em tarefas que mobilizam tanto recursos matemáticos quanto tecnológicos. Recomenda-se a continuidade e o aprimoramento dessa abordagem, com a inclusão de novas práticas laboratoriais e a ampliação do uso de tecnologias digitais, visando à formação de professores de Química e Matemática capazes de integrar conhecimentos de diferentes áreas para resolver problemas reais de ensino e aprendizagem.

Por fim, conclui-se que a implementação de um MER, que articule Química e Matemática de forma integrada e contextualizada, é fundamental para a construção de um ecossistema didático sustentável, no qual a matematização dos fenômenos químicos seja tratada não como um fim em si mesma, mas como um meio para aprofundar a compreensão dos processos naturais e fortalecer a prática pedagógica dos futuros docentes.

Referências

- BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- BALL, D. W. **Físico-química**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005. ISBN 85-221-0417-5.
- BARQUERO, B.; BOSCH, M.; GASCÓN, J. **Ecología de la modelización matemática: los recorridos de estudio e investigación**. Documents. Aportaciones de la teoría antropológica de lo didáctico: un panorama de la TAD. Marianna Bosch et al. (Orgs.). Barcelona: Centre de Recerca Matemàtica CRM, 2011. p. 553-577. Disponível em: <https://www.crm.cat>. Acesso em: 21 mar. 2025.
- BORBA, M. C.; SILVA, M. L. M. **Modelagem e educação matemática: o papel das tecnologias digitais**. Belo Horizonte: Autêntica, 2011.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular: educação é a base**. Brasília, DF: MEC, 2017. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.
- CHEVALLARD, Y. Some sensitive issues in the use and development of the anthropological theory of the didactic. **Educação Matemática Pesquisa**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 013-053, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.23925/1983-3156.2020v22i4p013-053>. Acesso em: 21 mar. 2025. Conferência apresentada no 6th International Congress on the Anthropological Theory of Didactics - CTAD6, Autrans, Grenoble, France, 23 jan. 2018.

CHEVALLARD, Yves. **L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique.** Recherches en Didactique des Mathématiques, v.19, n. 2, p. 221-266, 1999.

CONNORS, K. A. **Chemical kinetics: the study of reaction rates in solution.** Wisconsin-Madison: John Wiley & Sons, 1990.

LEITHOLD, L. **O cálculo com geometria analítica.** v. 1. 3. ed. São Paulo: Harbra, 1994.

NASCIMENTO JÚNIOR, J. V. do; CARVALHO, G. S. Um modelo epistemológico de referência em cálculo e cinética de reações químicas. **Educação Matemática Pesquisa: Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Educação Matemática**, São Paulo, v. 26, n. 3, p. 216–242, 2024. DOI: 10.23925/1983-3156.2024v26i3p216-242. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/emp/article/view/66728>. Acesso em: 22 mar. 2025.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de química analítica.** Tradução de Marco Tadeu Grassi. São Paulo: Cengage Learning, 2006. ISBN 85-221-0436-0. (Título original: Fundamentals of analytical chemistry).

TROUCHE, L.; DRIJVERS, P. Webbing and orchestration: two interrelated views on digital tools in mathematics education. **Teaching Mathematics and Its Applications**, Oxford, v. 33, p. 193-209, 2014.