

ANÁLISE CINÉTICA POR DESLOCAMENTO DE CURVA TG: UMA ABORDAGEM BASEADA EM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Keilly Grangeiro Wanderley, Kleilton Oliveira Santos, Pedro Carlos de Assis Júnior, Márcio José Batista Cardoso, Marcus Vinicius Lia Fook, Suédina Maria de Lima Silva



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n1p1554-1569>

Artigo recebido em 14 de Dezembro e publicado em 14 de Fevereiro de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

A análise termogravimétrica (TG) é amplamente utilizada para a determinação de parâmetros cinéticos e termodinâmicos, sendo que métodos não isotérmicos como Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) e Friedman requerem múltiplas taxas de aquecimento. Entretanto, a necessidade de diversas taxas é um fator limitante em muitos laboratórios devido ao tempo, disponibilidade instrumental e custos operacionais. Neste estudo, propõe-se uma metodologia alternativa baseada em uma única curva TG experimental, a partir da qual são geradas curvas simuladas por deslocamento controlado ao longo do eixo de temperatura, imitando diferentes taxas de aquecimento. O procedimento é estruturado com base em um planejamento fatorial completo multinível para avaliar a influência dos deslocamentos na energia de ativação (E_a). O polietileno de alta densidade (HDPE) e a quitosana (CS), materiais de natureza distintas, foram avaliados pelo método KAS. Os valores de E_a variaram entre 80–230 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para o HDPE e entre 16–130 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (1º estágio) e 60–350 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (2º estágio) para a CS, apresentando redução sistemática conforme o nível de deslocamento aplicado. O nível 1–1 apresentou os resultados mais próximos dos valores encontrados na literatura. Os resultados indicam que a metodologia de deslocamento de curvas TG pode representar uma alternativa viável para estimativas cinéticas em situações experimentais restritas.

Palavras-chave: Análise cinética; Kissinger-Akahira-Sunose; Deslocamento de curva; Planejamento experimental; Simulação.

ABSTRACT

Thermogravimetric analysis (TGA) is widely employed for determining kinetic and thermodynamic parameters, with non-isothermal methods such as Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO), and Friedman requiring multiple heating rates. However, the need for numerous heating rates is a limiting factor in many laboratories due to time constraints, instrumental availability, and operational costs. This study proposes an alternative methodology based on a single experimental TG curve, from which simulated curves are generated by a controlled shift along the temperature axis, thereby mimicking different heating rates. The procedure is structured using a multilevel full factorial design to evaluate the influence of the temperature shifts on the activation energy (E_a). High-density polyethylene (HDPE) and chitosan (CS), materials with distinct natures, were evaluated using the KAS method. The E_a values ranged from 80–230 kJ.mol⁻¹ for HDPE and from 16–130 kJ.mol⁻¹ (1st stage) and 60–350 kJ.mol⁻¹ (2nd stage) for CS, showing a systematic reduction as the applied shift level increased. The 1–1 level provided the closest results to the values reported in the literature. The findings indicate that the TG curve shifting methodology may represent a viable alternative for kinetic estimations in situations with experimental constraints.

Keywords: Kinetic Analysis; Kissinger-Akahira-Sunose; Curve Shift; Experimental Design; Simulation..

Instituição afiliada – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – Paraíba, Brasil.

Autor correspondente: Márcio José Batista Cardoso
marcio.cardoso@academico.ufpb.br

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A análise termogravimétrica (TG) é uma técnica consolidada para avaliação do comportamento térmico de materiais sólidos, permitindo determinar parâmetros fundamentais da decomposição térmica, como energia de ativação (E_a), entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) (Altarawneh et al., 2020; Bottom, 2008; Joraid et al., 2022; Karmarkar; Shashidhara, 2018). (A combinação da TG com métodos cinéticos não isotérmicos tem se mostrado particularmente útil para prever a estabilidade térmica, estimar mecanismos reacionais e modelar processos sob diferentes condições operacionais (Mazloun et al., 2021; Sbirrazzuoli, 2021).

Entre os modelos de cinética não isotérmica, destacam-se Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) e Friedman, baseados em múltiplas taxas de aquecimento. Esses métodos permitem determinar a energia de ativação sem pressupor um mecanismo específico, sendo adequados para sistemas complexos como polímeros (Gao; Nakada; Amasaki, 2001; Nomura; Terwilliger, 2019; Singh et al., 2021). Outros modelos, como Coats-Redfern (CR), Broido (B) e Horowitz-Metzger (HM), podem ser aplicados a uma única taxa, mas são mais sensíveis ao modelo cinético assumido (Çanakçı, 2020; Kulkarni; Mathad; Bakale, 2019; Xiang et al., 2014).

A principal limitação na aplicação dos métodos multi-taxas de aquecimento é a necessidade de numerosos experimentos, o que aumenta o tempo de análise, demanda maior disponibilidade do equipamento e eleva custos de operação e manutenção. Assim, estratégias que permitam extrair informações cinéticas precisas a partir de uma única curva TG têm despertado crescente interesse (Vyazovkin, 2021; Vyazovkin et al., 2011).

Neste contexto, o presente estudo propõe uma abordagem inovadora: a simulação de múltiplas curvas TG por deslocamento controlado da curva experimental, imitando o comportamento esperado em diferentes taxas de aquecimento. Essa simulação é estruturada em um planejamento experimental fatorial completo, permitindo avaliar de forma estatística a influência dos deslocamentos da curva TG na energia de ativação estimada pelo método KAS.

Como estudo de caso, selecionamos a quitosana (CS) e o polietileno de alta densidade (HDPE), dois polímeros de origens, estruturas e mecanismos de degradação

distintos. Esta abordagem busca minimizar o número de experimentos necessários e demonstrar que, quando devidamente controlada, a simulação por deslocamento pode fornecer parâmetros cinéticos confiáveis mesmo sem múltiplas taxas de aquecimento experimentais.

2 METODOLOGIA

Para realização do estudo foram utilizados polietileno de alta densidade (HDPE) IA58 adquirido da Braskem (Camaçari – BA/Brasil) e a quitosana de média massa molar (CS) adquirida do laboratório de desenvolvimento de biomateriais CERTBIO.

O HDPE utilizado sem qualquer modificação física ou química, sendo caracterizada em um equipamento Shimadzu DTG modelo 60H *thermal analyzer*, a CS amostra de média massa molar obtida do CERTBIO, também utilizada sem modificação, sendo caracterizada em um equipamento Perkin Elmer modelo *Pyris 1 TGA*. Ambas amostras foram avaliadas na faixa de 30 °C a 700 °C em uma taxa de 20 °C.min⁻¹, em uma atmosfera de nitrogênio (20 ml.min⁻¹).

2.1 CINÉTICA

Os parâmetros cinéticos foram calculados a partir das curvas de decomposição térmica (TG) utilizando um método de análise cinética baseado na Eq. (1) de Arrhenius.

$$\frac{d\alpha}{dT} = K(T)f(\alpha) \quad (1)$$

onde o termo $d\alpha/dt$ representa a taxa de reação, $k(T)$ é a constante de velocidade de reação, $f(\alpha)$ representa uma função que descreve a reação, α o grau de conversão, T a temperatura do processo.

Sendo o grau de conversão α , Eq. (2), definido como: onde (W_i) é a massa inicial da amostra, (W_f) é a massa final da amostra e (W_t) é a massa da amostra no decorrer do aquecimento.

$$\alpha = \frac{W_i - W_t}{W_i - W_f} \quad (2)$$

E a velocidade de reação $K(T)$ representada pela Eq. (3), onde A é fator pré-exponencial (min⁻¹), estando relacionado com a frequência de colisão entre as

moléculas, e é diretamente proporcional a (E_a) energia de ativação ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), (T) temperatura de pico da reação (K) e (R) a constante universal de gás ($0.008314 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

$$K(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

Substituindo Eq.(3) na equação de Arrhenius na Eq. (1), obtém-se a Eq. (4).

$$\frac{d\alpha}{dT} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha) \quad (4)$$

Que para experimentos não isotérmicos conduzidos a taxa de aquecimento constante, onde ($\beta = \frac{dT}{dt}$), a equação da taxa de decomposição pode ser simplificada e rearranjada para a parte direita da Eq. (5).

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha) \quad (5)$$

Para o método de (KAS) a equação reduzida é dada pela Eq. (6).

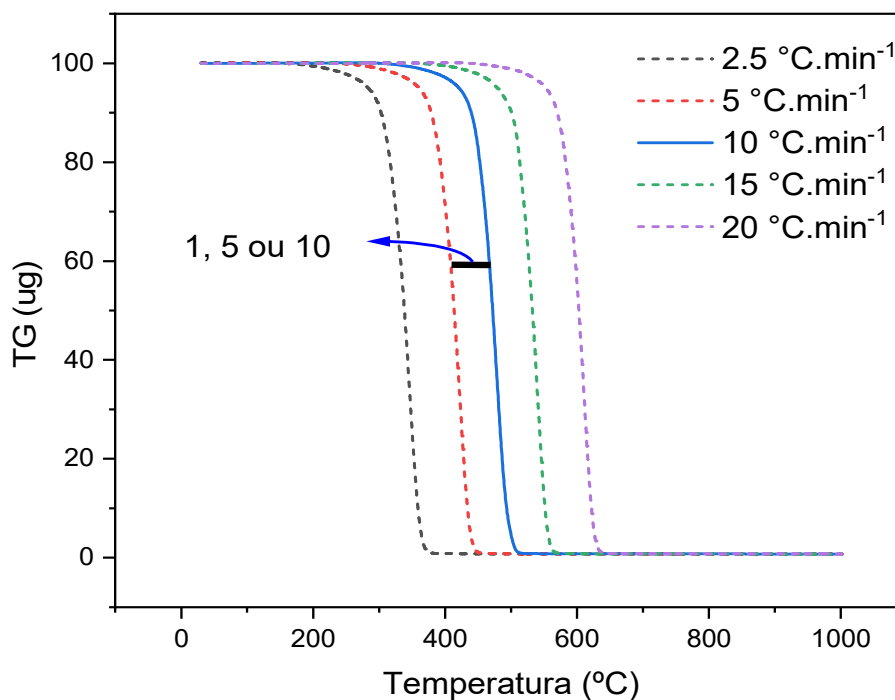
$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

onde (β) é a taxa de aquecimento.

A (β) desloca o pico de decomposição do polímero e quanto maior a (β) maior o deslocamento, como pode ser visualizado em estudos de (Abbas; Saber, 2018; Das; Tiwari, 2017; Jagriti, 2024).

A curva experimental da TG obtida a uma (β) de $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ das amostras foram deslocadas, foi deslocada ao longo do eixo da temperatura para simular (β) equivalentes a 2.5; 5; 15 e $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. Sendo definido um vetor de deslocamento (T), para (β) de 2.5 e $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ (deslocamento a esquerda (DE): negativo), e para 15 e $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ (deslocamento a direita (DD): positivo), conforme ilustra Figura 1.

Figura 1: Modelo do deslocamento da curva de TG.



A avaliação do efeito deslocamento da curva TG na energia de ativação e fator pré-exponencial obtida pelo método de (KAS), foi realizada de acordo planejamento experimental, multinível em triplicata, sendo dois fatores (DE e DD) versus três níveis cada, totalizando 9 combinações, avaliadas em triplicata, conforme (Tabela 1). Os resultados foram analisados por meio do software origin, pela regressão linear para determinação de E_a (método KAS), análise de variância (ANOVA) e nível de significância: $p < 0.001$.

Tabela 1: Planejamento fatorial multinível para o método de (KAS).

Variáveis Independentes em Código		Variáveis Independentes Atual	
Níveis		T (°C)	
(DE)	(DD)	(DE)	(DD)
1	2	1	5
2	2	5	5
2	3	5	10
1	1	1	1
3	1	10	1
3	3	10	10
2	1	5	1

3	2	10	5
1	3	1	10

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

3.1 CURVAS TG/DTG E ESTÁGIOS DE DEGRADAÇÃO

As curvas de TG e DTG para os materiais HDPE e CS são apresentadas na Fig. 2 (a e b). Em todos os estágios de degradação termal, foram determinadas as temperaturas de início (T_{onset}), temperatura de pico (T_p) e temperatura de fim (T_{offset}), bem como a respectiva perda de massa (P_m), valores apresentados na Tabela 2.

O HDPE, conforme ilustrado na Figura 2 (a), exibiu um único estágio de degradação estrutural, com (T_p) de 484 °C e uma (P_m) de aproximadamente 100 %, em concordância com (Natesakhawat *et al.*, 2024). A CS, por sua vez Figura 2 (b), apresentou dois estágios distintos de decomposição. O primeiro estágio (desidratação), com (T_p) de 38.33 °C e (P_m) de 11.24 %, é atribuído à liberação de moléculas de água adsorvidas, predominantemente ligadas aos grupos amino e hidroxila da quitosana. O segundo estágio (degradação estrutural), com (T_p) de 349.3 °C e (P_m) de 53.59 %, corresponde à decomposição das cadeias poliméricas, envolvendo tanto as unidades acetiladas quanto as desacetiladas. Este perfil de decomposição é consistente com os resultados observados por (Rodrigues *et al.*, 2020).

Figura 1: Curvas TG e DTG do HDPE (a) e CS (b).

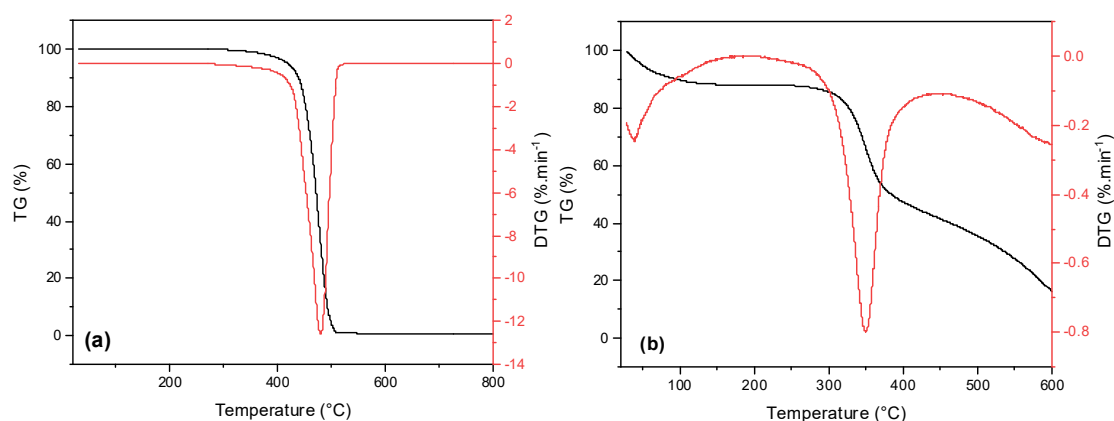


Tabela 1:Valores dos estágios de degradação do HDPE e CS.

Amostras	Estágio	T_{onset} (°C)	T_p (°C)	T_{offset} (°C)	P_m (%)
----------	---------	---------------------	---------------	----------------------	--------------

HDPE	1º	365.71	480.03	522.05	99.16
CS	1º	28.43	38.33	141.02	11.24
	2º	268.38	349.29	411.07	53.93

3.2 INFLUÊNCIA DOS DESLOCAMENTOS NA (E_a)

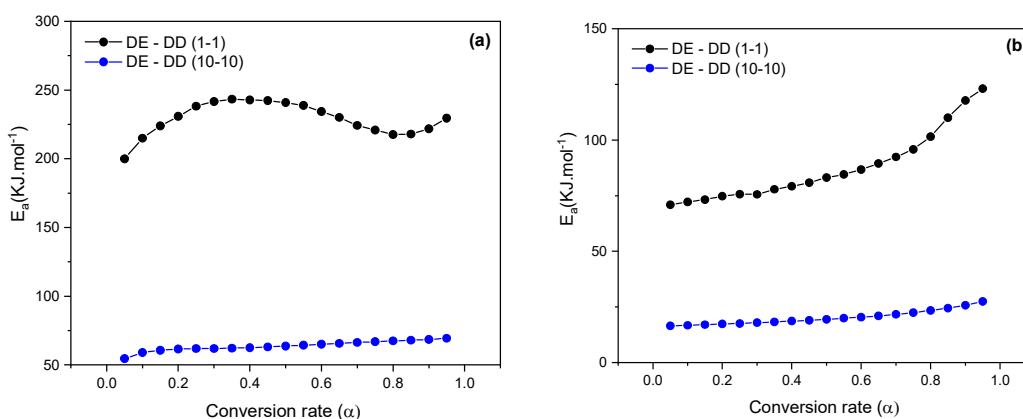
Os valores de (E_a) para a degradação do HDPE e da CS foram determinados pelo método de (KAS), aplicado a um planejamento experimental fatorial que investigou o efeito dos fatores de deslocamento das curvas TG (definidos como DE e DD).

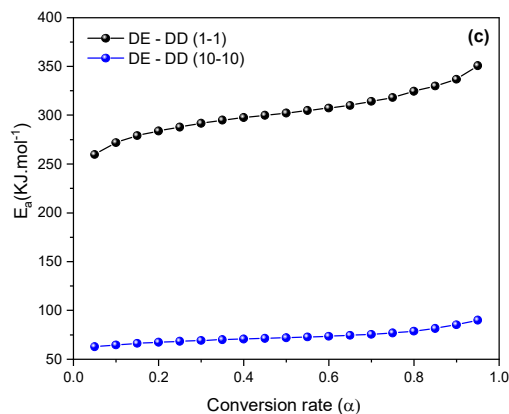
Na Figura 3 (a, b e c) destaca a dependência da (E_a) obtidos da degradação do HDPE (único estágio) e CS (dois estágios) em função da (α) para os diferentes níveis dos fatores DE e DD. Observou-se que valores crescentes de deslocamento (nível 3–3) reduziram progressivamente (E_a):

Para o HDPE Figura 3 (a), os valores de (E_a) obtidos na condição de maior deslocamento (níveis 3–3) variaram entre 55 e 69 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, representando apenas 27,38 % dos valores observados na condição de menor deslocamento (níveis 1–1), que variaram entre 199 e 243 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Comportamento semelhante foi verificado para a CS, tanto no primeiro estágio Fig. 3 (b); 16 – 28 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ em (3–3) versus 70 – 124 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ em (1–1) quanto no segundo estágio Figura 3 (c); 62 – 91 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ em (3–3) versus 259 – 351 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ em (1–1). Essa redução reflete o comportamento típico de experimentos com taxas elevadas, onde o atraso térmico provoca subestimação de (E_a).

Figura 2: Curvas (E_a) versus (α) para HDPE (a) e CS 1º estágio (b) e 2º estágio (c) baseada no modelo KAS.

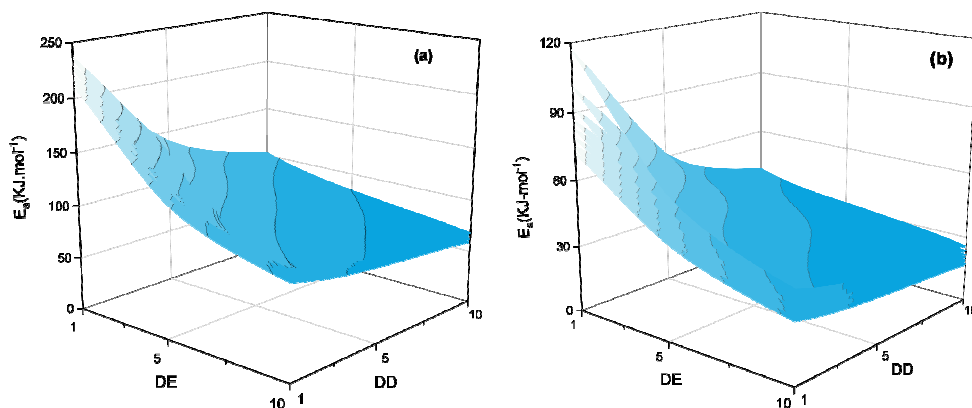


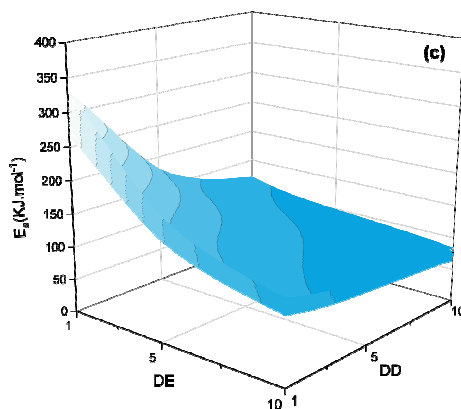


3.3 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA E MODELAGEM ESTATÍSTICA

A análise das superfícies de resposta da (E_a) em função dos fatores DE e DD para todas as (α) Figura 4 (a, b e c) evidencia uma correlação inversa e altamente significativa, ou seja, o aumento do deslocamento das curvas TG promove uma redução sistemática e pronunciada da (E_a) aparente. Este resultado demonstra que a sensibilidade da (E_a) às condições experimentais é capturada de forma robusta pela metodologia de deslocamento de curvas.

Figura 3: Superfície resposta da (E_a) em função dos fatores (DE e DD) para HDPE (a) e CS 1° estágio (b) e 2° estágio (c).





A ANOVA confirmou que ambos os fatores, DE e DD, foram altamente significativos ($p < 0.001$). Para o HDPE ($\alpha = 0.7$), o modelo de regressão gerado pela Eq. (7) apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 99.96 % e um desvio padrão residual de 1.09, indicando um excelente ajuste aos dados experimentais.

$$E_a = 112.6 + 37.5 * DE_1 - 6.2 * DE_2 - 31.3 * DE_3 + 40.5 * DD_1 - 9.3 * DD_2 - 31.2 * DD_3 + [\text{termos de interação}] \quad (7)$$

Resultados análogos foram obtidos para a CS, tanto no primeiro ($\alpha = 0.2$; $R^2 = 99.91$ %) quanto no segundo estágio ($\alpha = 0.5$; $R^2 = 99.97$ %), as Eq. de regressão (8) e (9) demonstram a complexa interação entre os fatores no valor final da (E_a).

$$E_a = 112.6 + 37.5 * DE_1 - 6.2 * DE_2 - 31.3 * DE_3 + 40.5 * DD_1 - 9.3 * DD_2 - 31.2 * DD_3 + [\text{termos de interação}] \quad (8)$$

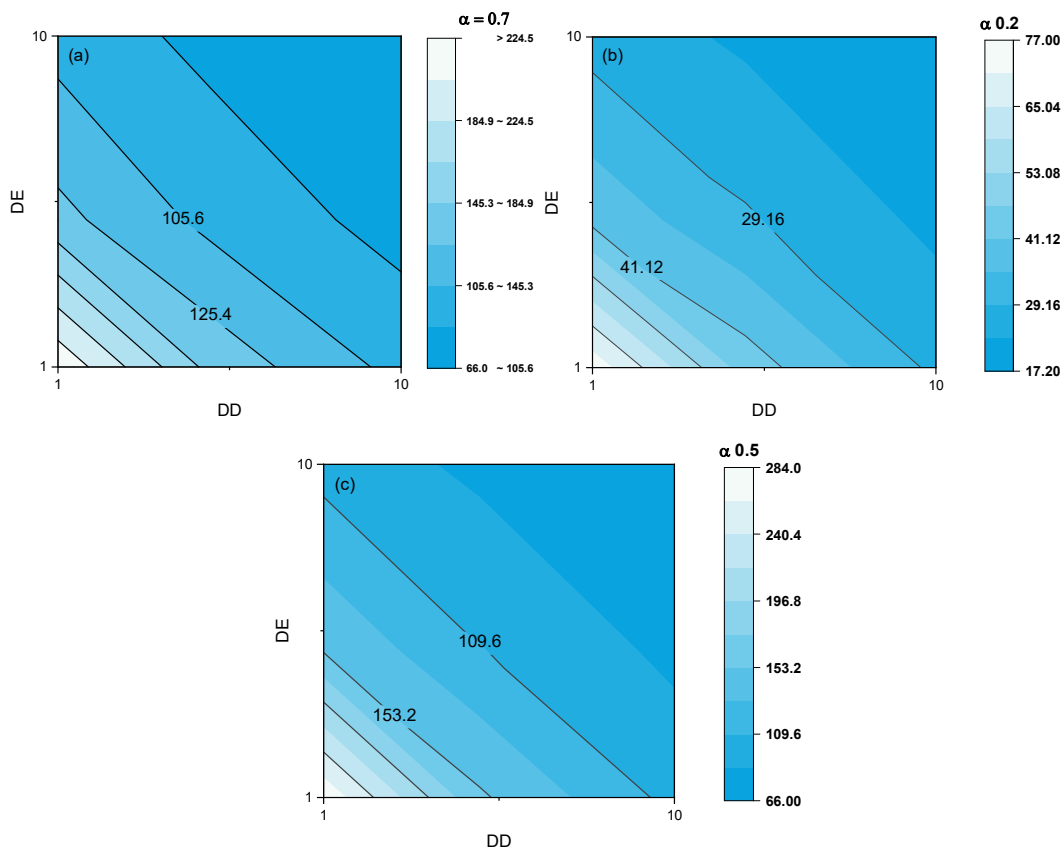
$$E_a = 33.8 + 13.3 * DE_1 - 1.7 * DE_2 - 11.6 * DE_3 + 15.2 * DD_1 - 3.4 * DD_2 - 11.8 * DD_3 + [\text{termos de interação}] \quad (9)$$

3.4 INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO (β) E CONFIABILIDADE DA (E_a)

A análise das superfícies de contorno da (E_a) em função dos fatores DE e DD, Figura 5 (a, b e c) revelam uma notável variação nos valores de (E_a), induzida exclusivamente pela manipulação dos fatores de deslocamento, que mimetizam o efeito de diferentes condições experimentais, como a (β).

No nível (1–1) para o HDPE em ($\alpha = 0.7$), Figura 5 (a), a (E_a) variou de 66.8 a 224.5 $kJ.mol^{-1}$. Padrão semelhante foi observado para a CS, com variações de 17.26 a 77.0 $kJ.mol^{-1}$. e no primeiro estágio ($\alpha = 0.2$), Figura 5 (b) e de 66.0 a 284.0 $kJ.mol^{-1}$. no segundo estágio ($\alpha = 0.5$), Figura 5 (c).

Figura 4: Superfície resposta da (E_a) em função dos fatores (DE e DD) para (α) na (T_p) do HDPE (a) e CS 1° estágio (b) e 2° estágio (c).



Ao analisar os valores de (E_a) reportados na literatura para o HDPE, obtidos pelo método de KAS na conversão ($\alpha = 0.7$) e sob atmosfera de nitrogênio, observa-se uma variação significativa entre os estudos ($75 - 270 \text{ kJ.mol}^{-1}$). Essa dispersão está diretamente relacionada às (β) empregadas nos experimentos. Trabalhos que utilizaram (β) elevadas, como Khedri e Elyasi (2016), com ($40 - 55 \text{ }^\circ\text{C.min}^{-1}$), reportaram valores de (E_a) substancialmente inferiores ($75 - 80 \text{ kJ.mol}^{-1}$), enquanto estudos baseados em (β) mais baixas, como Natesakhawat et al. (2024), que utilizaram ($5 - 20 \text{ }^\circ\text{C.min}^{-1}$), apresentaram energias muito mais altas ($260 - 270 \text{ kJ.mol}^{-1}$). Valores intermediários foram observados em estudos que empregaram combinações amplas ou moderadas (β), como Handawy et al. (2020), Abbas e Saber (2018), Das e Tiwari (2017) e Mazloum et al. (2021), resultando em (E_a) na entre ($135 - 250 \text{ kJ.mol}^{-1}$).

Ao analisar os valores da (E_a) reportados na literatura para a quitosana (CS) pelo método de KAS, em atmosfera de nitrogênio e nas mesmas conversões representativas dos dois estágios de decomposição ($\alpha = 0.2$) para a etapa de desidratação e ($\alpha =$

0.5) para a degradação principal), observa-se uma tendência consistente entre os estudos. Para o primeiro estágio, os valores de (E_a) variam entre 59.5 e 126 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, como reportado por Muraleedharan et al. (2015), Fouzi e Djalal (2022) e Georgieva et al. (2012), refletindo o caráter energeticamente menos exigente da remoção de água. Já para o segundo estágio, associado à degradação estrutural da cadeia polimérica, os valores de (E_a) mostram-se mais elevados e mais uniformes, situando-se majoritariamente entre 105 e 160 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, conforme observado por Polat e Sayan (2018), Moussout et al. (2016), Hamdaoui et al. (2021), Muraleedharan et al. (2015) e Takan (2025). Essa relativa convergência entre os estudos indica que, nas faixas usuais de (β) entre ($5 - 20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$), a determinação da (E_a) para a quitosana apresenta boa reprodutibilidade, evidenciando a consistência cinética do material quando avaliado pelo modelo de KAS.

Esse comportamento confirma que altas (β) deslocam as curvas TG/DTG para temperaturas maiores e intensificam limitações de transferência de calor, o que tende a subestimar a (E_a) pelo método KAS. Por outro lado, (β) mais baixas aproximam o sistema do equilíbrio térmico, reduzindo efeitos instrumentais e produzindo valores de (E_a) mais elevados e representativos da cinética intrínseca. Assim, a dispersão dos valores na literatura reflete principalmente o impacto direto da (β) sobre a determinação cinética pelo método KAS. Portanto, valores de (E_a) determinados a partir de experimentos que empregam múltiplas e baixas (β), minimizando esses efeitos, são considerados mais confiáveis e representativos da cinética química intrínseca do material.

A ampla variação observada neste trabalho, controlada pelos fatores DE e DD, corrobora a premissa de que a (E_a) aparente é fortemente influenciada pelas condições experimentais e por características do material, como massa molar, cristalinidade e rigidez da cadeia polimérica.

Em síntese, os resultados demonstram de forma inequívoca que a metodologia de deslocamento de curvas TG é uma ferramenta eficaz para investigar a sensibilidade da (E_a) às condições de análise. Foi estabelecido que maiores deslocamentos, análogos ao uso de altas (β), produzem valores de (E_a) significativamente menores, enquanto condições que minimizam o deslocamento (baixas (β)) fornecem estimativas mais elevadas e confiáveis para a (E_a).

4 CONCLUSÃO

A metodologia proposta demonstrou que o deslocamento sistemático da curva TG pode simular de forma eficaz o efeito de diferentes taxas de aquecimento sobre a energia de ativação estimada pelo método KAS. O aumento do deslocamento reduziu a energia de ativação de maneira previsível e consistente com o comportamento reportado em experimentos reais com múltiplas taxas de aquecimento. Entre os níveis avaliados, o deslocamento 1–1 apresentou melhores concordâncias com a literatura, indicando que simulações moderadas reproduzem condições experimentais realistas.

Esse método possibilita a obtenção de parâmetros cinéticos confiáveis mesmo na ausência de múltiplas curvas experimentais, sendo especialmente útil em laboratórios com limitações instrumentais. Como perspectivas futuras, recomenda-se expandir a metodologia para outros modelos não isotérmicos (FWO, Friedman), bem como avaliar diferentes formas de deslocamento (não linear, dependente de α) para simulações mais robustas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste – CERTBIO

5 REFERÊNCIAS

- ABBAS, Ammar S.; SABER, Marwa G. Kinetics of Thermal Pyrolysis of High-Density Polyethylene. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, [N.p.], vol. 19, no. 1, pp. 13–19, 2018. <https://doi.org/10.31699/ijcpe.2018.1.2..>
- ALTARAWNEH, Suha S.; MAX, Johannes B.; SCHACHER, Felix H.; ABABNEH, Taher S. Synthesis, characterization, thermodynamics and thermal degradation kinetics of imine-linked polymers. **Journal of Polymer Research**, [N.p.], vol. 27, no. 11, pp. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02317-9>.
- BOTTOM, Rod. Thermogravimetric Analysis. **Principles and Applications of Thermal Analysis**. [N.p.]: [N.p.], 2008. pp. 87–118.

- ÇANAKÇI, Dilek. Synthesis, Spectroscopic, Thermodynamics and Kinetics Analysis Study of Novel Polymers Containing Various Azo Chromophore. **Scientific Reports**, [N.p.], vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57264-3>.
- DAS, Pallab; TIWARI, Pankaj. Thermal degradation kinetics of plastics and model selection. **Thermochimica Acta**, [N.p.], vol. 654, no. May, pp. 191–202, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.06.001>.
- GAO, Zhiming; NAKADA, Masahiro; AMASAKI, Iwao. A consideration of errors and accuracy in the isoconversional methods. [N.p.], vol. 369, pp. 137–142, 2001.
- JAGRITI, Jagriti. Non-isothermal kinetic analysis of UHMWPE sheet. [N.p.], 2024.
- JORAID, Ahmad A.; OKASHA, Rawda M.; AL-MAGHRABI, Mahdi A.; AFIFI, Tarek H.; AGATEMOR, Christian; ABD-EL-AZIZ, Alaa S. Thermodynamic Parameters of Non-isothermal Degradation of a New Family of Organometallic Dendrimer with Isoconversional Methods. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, [N.p.], vol. 32, no. 7, pp. 2653–2663, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02317-w>.
- KARMAKAR, Sonali; SHASHIDHARA, G. M. Thermal decomposition kinetics of jute fiber filled HDPE composites. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, [N.p.], vol. 15, no. 1, pp. 33–40, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13196-018-0205-6>.
- KULKARNI, Akshay B.; MATHAD, Shridhar N.; BAKALE, Raghavendra P. The evaluation of kinetic parameters for cadmium doped Co-Zn ferrite using thermogravimetric analysis. **Ovidius University Annals of Chemistry**, [N.p.], vol. 30, no. 1, pp. 60–64, 2019. <https://doi.org/10.2478/auoc-2019-0011>.
- MAZLOUM, Shawki; ABOUMSALLEH, Youssef; AWAD, Sary; ALLAM, Nadine; LOUBAR, Khaled. Modelling pyrolysis process for PP and HDPE inside thermogravimetric analyzer coupled with differential scanning calorimeter. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [N.p.], vol. 176, p. 121468, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121468>.
- NATESAKHAWAT, Sittichai; WEIDMAN, Jennifer; GARCIA, Stephanie; MEANS, Nicholas C.; WANG, Ping. Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics. **Journal of the Energy Institute**, [N.p.], vol. 116, no. July, p. 101738, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101738>.
- NOMURA, Kazumasa; TERWILLIGER, Paul. Self-dual Leonard pairs of diagonalizable investigation on Nano-ZnO / IFR synergetic flame retarded monomer composites via different a many examples. [N.p.], pp. 50–60, 2019.
- RODRIGUES, Camila; DE MELLO, Josiane Maria Muneron; DALCANTON, Francieli;

MACUVELE, Domingos Lusitâneo Pier; PADOIN, Natan; FIORI, Márcio Antônio; SOARES, Cíntia; RIELLA, Humberto Gracher. Mechanical, Thermal and Antimicrobial Properties of Chitosan-Based-Nanocomposite with Potential Applications for Food Packaging. **Journal of Polymers and the Environment**, [N.p.], vol. 28, no. 4, pp. 1216–1236, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01678-y>.

SBIRRAZZUOLI, Nicolas. Thermochimica Acta Model-free isothermal and nonisothermal predictions using advanced isoconversional methods. **Thermochimica Acta**, [N.p.], vol. 697, no. December 2020, p. 178855, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178855>.

SINGH, Sanjay; PATIL, Trilok; TEKADE, Shyam P.; GAWANDE, Manoj B.; SAWARKAR, Ashish N. Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of corn cob and polyethylene: Thermal degradation behavior, possible synergism, kinetics, and thermodynamic analysis. **Science of the Total Environment**, [N.p.], vol. 783, p. 147004, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147004>.

VYAZOVKIN, Sergey. Determining Preexponential Factor in Model-Free Kinetic Methods: How and Why? **Molecules**, [N.p.], vol. 26, no. 11, p. 3077, 21 May 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26113077>.

VYAZOVKIN, Sergey; BURNHAM, Alan K; CRIADO, José M; PÉREZ-MAQUEDA, Luis A; POPESCU, Crisan; SBIRRAZZUOLI, Nicolas. Thermochimica Acta ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. **Thermochimica Acta**, [N.p.], vol. 520, nos. 1–2, pp. 1–19, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034>.

XIANG, H. X.; WANG, S. C.; WANG, R. L.; WEN, X. S.; ZHOU, Z.; ZHU, M. F. Synthesis, structure and thermal properties of poly(A-block-B-block-A) copolymer based on biodegradable poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and amorphous polystyrene. **Materials Research Innovations**, [N.p.], vol. 18, pp. S4864–S4868, 2014. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000793>.