

# EFEITO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE EPOXIDAÇÃO DO ÓLEO DE CRAMBE UTILIZANDO ÁCIDO PERACÉTICO PRODUZIDO *IN SITU*

Isabela Julio Iwassa<sup>1</sup>, Lúcio Cardozo-Filho<sup>2</sup>, Camila da Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Maringá/PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM.  
isa\_iwassa@hotmail.com

<sup>2</sup> Orientador, Doutor, Departamento de Engenharia Química, Maringá/PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM.  
lucio.cardozo@gmail.com

<sup>3</sup> Orientadora, Doutora, Departamento de Engenharia Química, Maringá/PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM.  
camiladasilva.eq@gmail.com

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito das variáveis de processo na conversão relativa ao oxigênio oxirano na reação de epoxidação do óleo de crambe. Para isto, utilizou-se um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> avaliando diferentes níveis de temperatura (40, 55 e 70 °C) e de razão molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C (1,1 mols, 1,55 mols e 2,0 mols). Após a seleção da melhor condição do planejamento obteve-se cinéticas de reação para verificar o efeito na quantidade de catalisador na reação (1,8%, 2,4% e 3,0% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). A análise dos resultados demonstra que maiores conversões relativas ao oxigênio oxirano são obtidas em níveis mais elevados de temperatura. Por outro lado, a variável razão molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C não apresentou efeito na reação de epoxidação do óleo de crambe. Em relação a quantidade de catalisador, pode-se observar que o aumento de 1,8% para 2,4% e 3,0% resultou em aumento da conversão do oxigênio oxirano. A condição que possibilitou obter a maior conversão em oxigênio oxirano (67,29%) foi: temperatura de 70 °C, razão de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C de 1,1:1 mols e 2,4% de catalisador. A análise de espectroscopia de transformada de Fourier confirmou que a reação de epoxidação do óleo de crambe foi efetiva devido ao aparecimento do pico 823 cm<sup>-1</sup> referente aos grupos oxiranos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ácido sulfúrico, *Crambe abyssinica* H., Oxigênio oxirano; Peróxido de hidrogênio.

## 1 INTRODUÇÃO

Recentemente, a indústria química tem procurado diversas soluções para os problemas que os produtos químicos derivados de petróleo causam, investigando novas substituições para estes materiais (PICCOLO *et al.*, 2018). A alternativa à matéria-prima inicial deve-se basear no uso de recursos naturais de fácil acesso e baixo custo que sejam renováveis, sustentáveis e biodegradáveis (ACHAWANGKUL *et al.*, 2016; BHALERAO; KULKARNI; PATWARDHAN, 2018). Neste contexto, os óleos vegetais apresentam excelente solução, uma vez que são recursos renováveis largamente disponíveis, de baixo custo de produção, baixa toxicidade e natural biodegradabilidade. Eles podem sofrer diversas modificações estruturais, sendo quimicamente transformados para o desenvolvimento de produtos que possam ser utilizados na substituição de derivados de petróleo (MUNGROO *et al.*, 2008). No caso, óleos vegetais com altos teores de ácidos graxos insaturados podem ser facilmente funcionalizados transformando-se em anéis oxirânicos por uma reação conhecida como epoxidação (TAYDE *et al.*, 2011). A literatura relata diversas aplicações para óleos vegetais epoxidados, como plastificantes (PETROVIC *et al.*, 2013), resinas (TAN; CHOW, 2011), revestimentos (YILDIRIM *et al.*, 2013) e biolubrificantes (VALLE *et al.*, 2018).

Epoxidação é o nome dado à reação onde as duplas ligações presentes na estrutura do óleo vegetal são substituídas pelo anel oxirano, o qual é formado por dois átomos de carbono e um oxigênio. Existem diversos métodos que já foram propostos para reação de epoxidação de óleos. No entanto, a nível industrial, a reação de Prilezhaev é a abordagem mais empregada, a qual consiste na epoxidação do óleo por meio de um perácido produzido *in situ* através da reação de uma solução de peróxido de hidrogênio e um ácido carboxílico (geralmente ácido fórmico ou acético) (KIM; LI; SUN, 2015; AGUILERA *et al.*, 2019). Se

necessário, ácidos inorgânicos, enzimas, complexos metálicos ou resinas de troca iônica ácida podem atuar como catalisadores da reação (TAYDE *et al.*, 2011; JANKOVIC *et al.*, 2014).

A escolha do óleo a ser utilizado na reação de epoxidação depende do grau de insaturação de seus ácidos graxos. Além disso, em questão de viabilidade econômica, existe a possibilidade de reduzir consideravelmente o preço do óleo vegetal epoxidado ao optar por uma matéria-prima que não seja utilizada para fins comestíveis (TAYDE *et al.*, 2011).

Devido suas características, o óleo de crambe (*Crambe abyssinica* H.) se mostra uma alternativa viável como uma matéria-prima de alta estabilidade oxidativa e elevado teor de fitosteróis e tocoferóis (SANTOS *et al.*, 2015; MELLO *et al.*, 2020). Este óleo compõe ~92% de ácidos graxos insaturados, que se destacam o ácido oléico (~20.8%), ácido linoléico (~6.26%) e o ácido erúcido (~58.97%) (TRENTINI *et al.*, 2020). O ácido erúcido (C22:1n-9) e seus derivados apresentam qualidades interessantes, sendo empregados como aditivos em plásticos e como componentes em óleos lubrificantes biodegradáveis. Em óleos comestíveis este ácido é permitido em até 2% e a sua alta ingestão está relacionado a problemas de saúde como lipídose miocárdica e necrose miocárdica (GOSWAMI; BASU; DE, 2012). Dessa forma, devido sua toxicidade, a alta concentração deste composto impede que este óleo compita com óleos comestíveis e estas características favorece sua aplicação na produção de epóxidos com excelente valor econômico.

Diante do contexto, o objetivo do trabalho foi verificar a viabilidade da epoxidação do óleo de crambe avaliando os parâmetros de processo como temperatura, razão molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e quantidade de catalisador.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAL

O óleo utilizado para as reações de epoxidação foi obtido através de doação do laboratório de óleos da Universidade Federal de Lavras (UFLA, Lavras, Minas Gerais, Brazil).

As reações foram conduzidas utilizando ácido acético glacial (Química Moderna), ácido sulfúrico (Anidrol), peróxido de hidrogênio 35% (Anidrol), bissulfito de sódio (Dinâmica), sulfato de sódio (Dinâmica) e éter etílico (Anidrol). Na determinação da composição de ácidos graxos e do teor de oxigênio oxirano foram utilizados: heptano (Anidrol), metanol (Panreac, >99,9%), hidróxido de potássio (Biotec), ácido sulfúrico (Anidrol), ácido bromídrico (Êxodo científica), clorofórmio (Anidrol) e violeta de metila (Êxodo científica). Para a análise de espectroscopia de transformada de Fourier utilizou brometo de potássio grau FTIR (Sigma-Aldrich, >99,9%).

### 2.2 MÉTODOS

A epoxidação foi realizada em aparato experimental que consiste em reatores de vidro de 50 mL com tampa de borracha sobre um agitador magnético (KA Works / IKA Werke GmbH & Co. KG, IKA RCT Basic, Campinas, Brazil) a fim de manter a solução homogeneizada durante toda reação. Os reatores são acoplados a um banho termostático para controle da temperatura do processo (VWR, Model MX, Radnor, EUA).

O reator foi carregado inicialmente com a quantidade necessária de óleo de crambe, ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). A mistura foi continuamente agitada por 30 min até completa dissolução do óleo. Após a estabilização da temperatura de

síntese, a quantidade calculada de solução aquosa de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35% (v/v) foi adicionada lentamente sob agitação constante. A completa adição do peróxido de hidrogênio foi assumida como tempo zero. Ao término da reação, foi adicionado a mistura bissulfito de sódio até o desprendimento total das bolhas devido à reação de neutralização e sulfato de sódio para remover toda a água residual do produto epoxidado. A amostra epoxidada será separada em duas fases (orgânica e aquosa) em um funil de separação onde a fase etérea será extraída com éter etílico.

Para avaliar os efeitos da temperatura e da razão molar de peróxido de hidrogênio para insaturação etilênica (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C) foi adotado um planejamento fatorial 2<sup>2</sup>, com quatro repetições no ponto central, conforme mostrado na Tabela 1. Os níveis de temperatura e razão molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C foram selecionados a partir de dados reportados na literatura (DINDA *et al.*, 2008; MUSIK; MICHERT, 2017). As reações foram conduzidas nas mesmas condições reportadas por Piccolo *et al.* (2019), utilizando razão molar de ácido acético para insaturação etilênica (CH<sub>3</sub>COOH:C=C) de 0,55:1, 1,8% de catalisador (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), agitação de 450 rpm durante 4 horas de processo.

**Tabela 1:** Fatores, níveis reais e codificados usados no planejamento fatorial para a reação do óleo de crambe.

Fatores	Níveis		
	Baixo (-1)	Central (0)	Alto (1)
Temperatura (°C)	40	55	70
Razão molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :C=C	1,10	1,55	2,00

A variável resposta (conversão relativa ao oxigênio oxirano) foi calculada a partir das análises do produto epoxidado e, após foi realizada por meio do software Statistica 8.0 (STATSOFT™, Inc.) a análise dos dados experimentais com nível de confiança de 95%. A análise de variância (ANOVA) foi usada para avaliar o efeito dos fatores na resposta da variável.

A partir do ponto ótimo obtido no planejamento, foram realizadas reações para avaliar as curvas cinéticas e a porcentagem de catalisador nos tempos de 2, 4, 6, 8 e 10 horas utilizando 1,8%, 2,4% e 3,0% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

A composição em ácidos graxos (AG) do óleo antes e após a epoxidação foi determinada a partir da derivatização do óleo em duas etapas descrita por Santos Júnior (2014) e as amostras foram injetadas em um cromatógrafo a gás (Shimadzu, modelo CG-2010 Plus) acoplado a um com espectro de massas (Shimadzu, modelo CGMS-QP2010 SE) equipado com coluna capilar ZB-Wax (Zebron™, 30 m x 0.25 mm x 0.25 µm). O valor de iodo foi determinado de acordo com o método oficial AOCS Cd 1c-85, que pode ser calculado considerando a composição em ácidos graxos do óleo antes e após a epoxidação (AOCS, 1998). O teor de oxigênio oxirano do óleo epoxidado foi determinado empregando o método AOCS Cd 9-57. A partir dos valores obtidos para o teor de oxigênio oxirano e valor de iodo, a porcentagem de conversão relativa ao oxirano (CRO) foi calculada a partir da razão entre o conteúdo de oxigênio oxirano em 100 g de óleo (OO<sub>EXP</sub>) e o conteúdo de oxigênio oxirano teórico em 100 g de óleo (OO<sub>T</sub>), conforme a Equação 1 (GOUD *et al.*, 2007).

$$(1) \quad CRO = \frac{OO_{EXP}}{OO_T}$$

O teor de oxigênio oxirano teórico foi determinado pela Equação 2 considerando as massas atômicas do iodo (A<sub>i</sub> = 126,9) e oxigênio (A<sub>o</sub> = 16,0) e o valor de iodo inicial da amostra de óleo (VI<sub>0</sub>).

$$OO_T = \left\{ \frac{(IV_0/2A_i)}{[100+(IV_0/2A_i)A_o]} \right\} \times A_o \times 100 \quad (2)$$

A análise de espectroscopia de infravermelho de transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para examinar as alterações nos grupos funcionais antes e após a reação de epoxidação. Os espectros foram registrados utilizando um espectrômetro (Thermo Scientific, Nicolet iN10) utilizando a técnica de pastilhas de KBr na faixa de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e média de 64 varreduras.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta as condições experimentais utilizadas para a epoxidação do óleo de crambe, bem como os resultados em termos de conversão relativa ao oxigênio oxirano. Os valores obtidos para as conversões em todos os experimentos realizados variaram de 4,41 a 46,38%.

**Tabela 2:** Condições experimentais e resultados para conversão relativa ao oxigênio oxirano da epoxidação do óleo de crambe.

Experimento	Temperatura (°C)	Razão molar H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :C=C (mols)	CRO <sup>1</sup> (%)
1	40	1,10	5,90
2	70	1,10	46,38
3	40	2,00	4,41
4	70	2,00	27,87
5	55	1,55	24,52±0,30 <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Conversão relativa ao oxigênio oxirano; <sup>2</sup>Valor médio das quatro repetições±desvio padrão

Os efeitos das variáveis experimentais analisadas nas reações de epoxidação do óleo de crambe são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Efeito das variáveis independentes sobre a conversão relativa ao oxigênio oxirano para epoxidação do óleo de crambe.686,10

Variáveis	Efeitos <sup>a</sup>	p-valor <sup>b</sup>
Média/Interação	22,83	
T (L)	31,97	<0,01
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :C=C (L)	-10,00	0,02
T x H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :C=C	-8,51	0,04

T - temperatura; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C - razão molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C. <sup>a</sup> Efeito da variável independente na variável dependente; <sup>b</sup> significância estatística p<0,05.

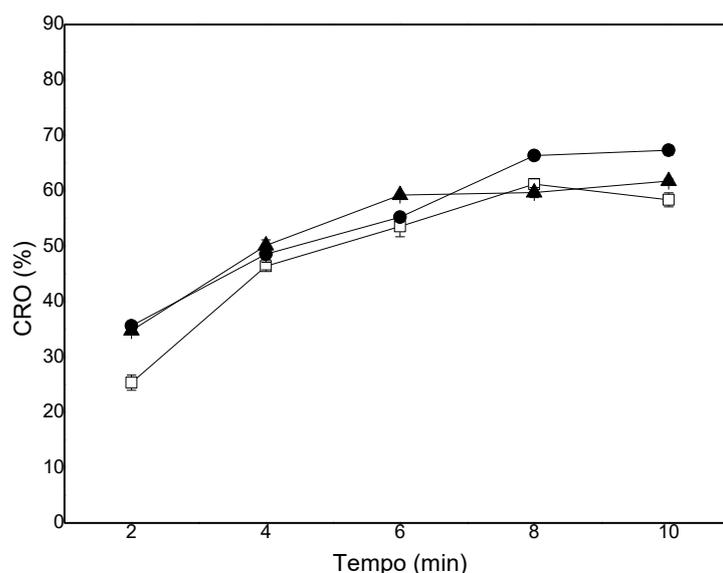
De acordo com a significância estatística considerada (valor *p*), pode-se observar que maiores conversões relativas ao oxigênio oxirano são obtidas em níveis mais elevados de temperatura. Por outro lado, a variável razão molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:C=C não apresentou efeito na reação de epoxidação do óleo de crambe.

A análise dos resultados mostra que o acréscimo da temperatura de 40 °C para 70 °C acarreta um aumento médio na CRO de ~609%. Haro *et al.* (2016) mencionam que em baixas temperaturas de reação a concentração de oxigênio do oxirano aumenta com o tempo de reação, no entanto, exige-se longos tempos para atingir um alto rendimento, o que pode estar relacionado as baixas conversões obtidas a 40 °C dado que as reações foram conduzidas até 4 horas, necessitando de um tempo superior para alcançar maiores

conversões. Goud *et al.* (2006) observaram que altas temperaturas de operação (75-85 °C) resultam em maiores taxas iniciais de reação, e o conteúdo máximo de oxigênio oxirano foi atingido em menor tempo (3,5 h) quando comparado com faixas de temperaturas mais baixas.

Por outro lado, em relação a variável razão molar  $H_2O_2:C=C$  observa-se que o aumento da razão de 1,1 para 2,0 ocasiona a diminuição na conversão do oxirano. No estudo de epoxidação do óleo de rícino, os autores observaram que a maior seletividade foi alcançada quando a razão molar de peróxido de hidrogênio para ligação dupla foi de 1,5, uma vez que concentrações de  $H_2O_2$  acima disto levam a uma maior taxa de decomposição do anel epóxi (SINADINOVIĆ-FIŠER; JANKOVIĆ; BOROTA, 2012). De certa forma, a menor quantidade de peróxido de hidrogênio é interessante uma vez que o mesmo é utilizado para a epoxidação de óleos vegetais em solução aquosa o que, conseqüentemente, gera menor quantidade de água residual que precisa ser tratada após o processo ocasionando em redução de custos (JANKOVIĆ, GOVEDARICA, SINADINOVIĆ-FIŠER, 2020).

Para avaliar o efeito da quantidade de catalisador (Gráfico 1), as reações foram realizadas na condição de maior rendimento obtida no planejamento, sendo temperatura de 70 °C e razão molar  $H_2O_2:C=C$  de 1,1 nas concentrações de 1,8%, 2,4% e 3,0% de  $H_2SO_4$ .

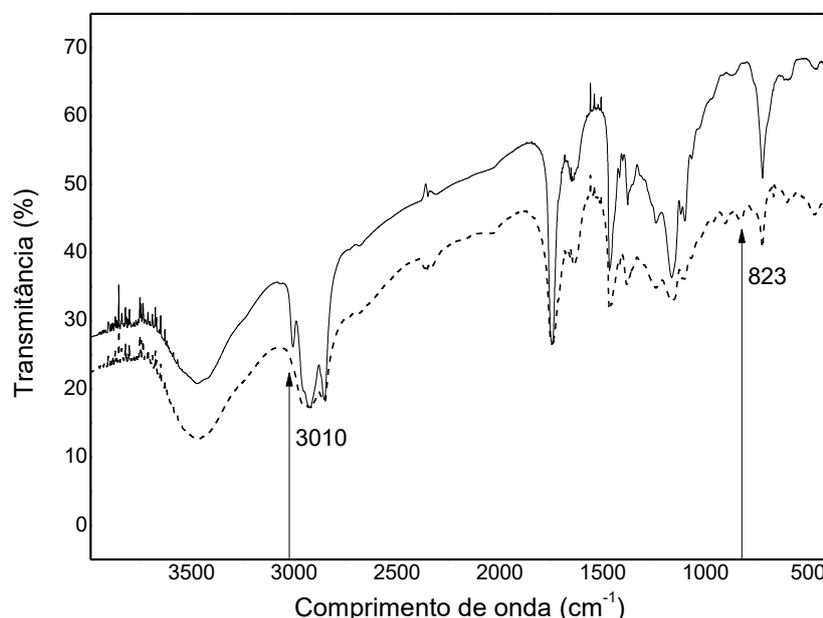


**Gráfico 1:** Efeito da quantidade de catalisador na reação de epoxidação do óleo de crambe a 70°C utilizando razão molar de  $H_2O_2:C=C$  – 1,1:1 com 1,8% (□), 2,4% (●) e 3,0% (▲) de  $H_2SO_4$  na conversão relativa ao oxigênio oxirano.

Em relação a quantidade de catalisador, pode-se observar que em apenas 2 h de processo é possível aumentar em média 38,71% da CRO ao elevar a quantidade de  $H_2SO_4$  para 2,4% e 3,0%. A reação conduzida com 3,0% é a mais eficiente na produção de epóxidos até 6 h, no entanto, a partir deste tempo a conversão entra em equilíbrio. Por outro lado, utilizando 2,4% de  $H_2SO_4$  é possível obter uma conversão de 67,29% em oxigênio oxirano em 10 h de reação. No estudo sobre a epoxidação do óleo de gergelim de Musik e Milchert (2017), observam um aumento de ~38% no conteúdo de oxigênio oxirano ao elevar a concentração do ácido sulfúrico de 2% para 3% em 4 h de reação, alcançando uma seletividade máxima de transformação etilênica de 92%.

Ao observar a curva cinética obtida para a concentração de 1,8% de  $H_2SO_4$  pode-se constatar que a maior conversão foi obtida em 8 horas de reação, apresentando um leve declínio após esse tempo. Piccolo *et al.* (2019) relatam que a 70 °C a conversão em oxirano máxima é obtida em um tempo ligeiramente superior a 3 h sendo observado uma queda na conversão após esse tempo. Esses comportamentos se dão porque quando o tempo de reação é muito curto, a conversão das duplas ligações em oxirano é incompleta ocasionando em menor conteúdo de epóxi; no entanto, em tempos de reação muito longos ocorre a reação de abertura do anel oxirano resultando em baixos teores de epóxi (KIM; LI; SUN, 2015).

A análise de espectroscopia de FTIR é apresentada no Gráfico 2 e foi realizada para confirmação na mudança na estrutura do óleo de crambe após a reação de epoxidação. A amostra utilizada para comparação foi a obtida na condição de maior conversão em oxigênio oxirano: temperatura de 70 °C, razão de  $H_2O_2:C=C$  de 1,1:1 mols e 2,4% de catalisador.



**Gráfico 2:** Espectro de FTIR obtidos para o óleo de crambe (—) e para o óleo de crambe epoxidado (----)

O pico de absorção localizado em 3010  $cm^{-1}$  atribuído às duplas ligações (C=C) dos ácidos graxos está presente apenas no espectro referente ao óleo de crambe antes da epoxidação. A ausência desse pico no espectro do óleo de crambe epoxidado indica que as duplas ligações presentes no óleo foram convertidas. Do mesmo modo, o pico referente aos grupos oxiranos (823  $cm^{-1}$ ) aparece no espectro da amostra após a reação, confirmado a formação de epóxidos a partir do óleo de crambe.

#### 4 CONCLUSÕES

A viabilidade da epoxidação do óleo de semente de crambe utilizando ácido peracético formado *in situ* foi demonstrada. O óleo de crambe apresenta características interessantes para ser utilizado para a produção de epóxidos e o fato do mesmo não ser destinado a alimentação pode ser benéfico do ponto de vista econômico. A análise

estatística do desenho experimental mostrou que a influência da temperatura sobre o desempenho da reação é relevante, enquanto a razão molar  $H_2O_2:C=C$  não tem influência no processo. Por fim, ficou comprovado que um sistema contendo ácido acético, peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico é eficiente para produção de epóxidos a partir do óleo de crambe alcançando uma conversão de ~67%.

## REFERÊNCIAS

ACHAWANGKUL, Yaowateera; MARUYAMA, Naoki; HIROTA, Masafumi; CHAICHANA, Chatchawan; SEDPHO, Surat; SATABUTR, Twarath. Evaluation on environmental impact from the utilization of fossil fuel, electricity and biomass producer gas in the double-chambered crematories. **Journal of Cleaner Production**, v. 134, p. 463-468, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.030>. Acesso em: 30 jun. 2021.

AGUILERA, Adriana Freites; TOLVANEN, Pasi; ERÄNEN, Kari; WARNA, Johan; LEVENEUR, Sebastien; MARCHANT, Timothy; SALMI, Tapio. Kinetic modelling of Prileschajew epoxidation of oleic acid under conventional heating and microwave irradiation. **Chemical Engineering Science**, v. 199, n. 1, p. 426-438, mai 2019. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.01.035>. Acesso em: 30 jun. 2021.

AOCS Official Method Cd 9-57 and Cd 1-25. *In: Official Method and Recommended Practices of the AOCS*, 1998.

BHALERAO, Machhindra S.; KULKARNI, Vaishali M.; PATWARDHAN, Anand V. Ultrasound-assisted chemoenzymatic epoxidation of soybean oil by using lipase as biocatalyst. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 912-920, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.042>. Acesso em: 30 jun. 2021.

DINDA, Srikanta; PATWARDHAN, Anand V.; GOUD, Vaibhav V.; PRADHAN, Narayan C. Epoxidation of cottonseed oil by aqueous hydrogen peroxide catalysed by liquid inorganic acids. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 9, p. 3737-3744, jun. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.015>. Acesso em: 29 jun. 2021.

GOSWAMI, Debajyoti; BASU, Jayanta Kumar; DE, Sirshendu. Optimal hydrolysis of mustard oil to erucic acid: A biocatalytic approach. **Chemical Engineering Journal**, v. 181-182, n. 1, p. 542-548, fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.070>. Acesso em: 30 jun. 2021.

GOUD, Vaibhav V.; PATWARDHAN, Anand V.; DINDA, Srikanta; PRADHAN, Narayan C. Kinetics of epoxidation of jatropha oil with peroxyacetic and peroxyformic acid catalysed by acidic ion exchange resin. **Chemical Engineering Science**, v. 15, n. 15, p. 4065-4076, ago. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.038>. Acesso em: 29 jun. 2021.

GOUD, Vaibhav V.; PRADHAN, Narayan C.; PATWARDHAN, Anand V. Epoxidation of Karanja (*Pongamia glabra*) Oil by  $H_2O_2$ . **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 83, p. 635-640, jul. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1250-7>. Acesso em: 19 jul. 2021.

HARO, Juan C.; IZARRA, Irene; RODRÍGUEZ, Juan F.; PÉREZ, Ángel; CARMONA, Manuel. Modelling the epoxidation reaction of grape seed oil by peracetic acid. **Journal of**

**Cleaner Production**, v. 138, p. 70-76, dez. 2016. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.015>. Acesso em: 19 jul. 2021.

JANKOVIĆ, Milovan R.; GOVEDARICA, Olga M.; SINADINOVIC-FISER, Snežana V. The epoxidation of linseed oil with in situ formed peracetic acid: A model with included influence of the oil fatty acid composition. **Industrial Crops and Products**, v. 143, p. 111881, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111881>. Acesso em: 19 jul. 2021.

JANKOVIC, Milovan R.; SINADINOVIC-FISER, Snezana V.; GOVEDARICA, Olga M. Kinetics of the Epoxidation of Castor oil with Peracetic Acid formed in Situ in the presence of na IonExchange Resin. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 22, p. 9357-9364, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie500876a>. Acesso em: 30 jun. 2021.

KIM, Namhoon; LI, Yonghui; SUN, Xiuzhi Susan. Epoxidation of Camelina sativa oil and peel adhesion properties. **Industrial Crops and Products**, v. 64, n. 1, p. 1-8, fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.025>. Acesso: 30 jun. 2021.

MELLO, Bruna Tais Ferreira; TRENTINI, Caroline Portilho; POSTAUE, Najla; SILVA, Camila. Sequential process for obtaining methyl esters and triacetin from crambe oil using pressurized methyl acetate. **Industrial Crops and Products**, v. 147, p. 112233, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112233>. Acesso em: 30 jun. 2021.

MUNGROO, Rubeena; PRADHAN, Narayan C.; GOUD, Vaibhav V.; DALAI, Ajay K. Epoxidation of Canola Oil with Hydrogen Peroxide Catalyzed by Acidic Ion Exchange Resin. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 85, p. 887-896, set. 2008. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11746-008-1277-z>. Acesso em: 30 jun. 2021.

MUSIK, Marlena; MILCHERT, Eugeniusz. Selective epoxidation of sesame oil with peracetic acid. **Molecular Catalysis**, v. 433, n. 1, p.170-174, mai. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.02.012>. Acesso em: 29 jun. 2021.

PICCOLO, Damiano; VIANELLO, Chiara; LORENZETTI, Alessandra; MASCHIO, Giuseppe. Epoxidation of soybean oil enhanced by microwave radiation. **Chemical Engineering Journal**, v. 377, n. 1, p. 120113, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.050>. Acesso em: 29 jun. 2021.

SANTOS JÚNIOR, Oscar O.; MONTANHER, Paula F.; BONAFÉ, Elton G.; PRADO, Ivanor N.; MARUYAMA, S. A.; MATSUSHITA, Makoto; VISENTAINER, Jesuí V. A simple, fast and efficient method for transesterification of fatty acids in foods assisted by ultrasound energy. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 25, n. 9, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140166>. Acesso em: 29 jun. 2021.

SANTOS, Kátia Andressa; BARICCATTI, Reinaldo Aparecido; CARDOZO-FILHO, Lúcio Cardozo; SCHNEIDER, Ricardo; PALÚ, Fernando; SILVA, Camila; SILVA, Edson Antônio. Extraction of crambe seed oil using subcritical propane: Kinetics, characterization and modeling. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 104, p.54- 61, set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.05.026>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SINADINOVIĆ-FIŠER, Snežana; JANKOVIĆ, Milovan; BOROTA, Olga. Epoxidation of castor oil with peracetic acid formed in situ in the presence of an ion exchange resin. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 62, p. 106-113, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.08.005>. Acesso em: 19 jul. 2021.

TAN, S. G.; CHOW, W. S. Curing Characteristics and Thermal Properties of Epoxidized Soybean Oil Based Thermosetting Resin. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 88, n. 1, p. 915-923, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11746-010-1748-x>. Acesso em: 30 jun. 2021.

TAYDE, Saurabh; PATNAIK, M.; BHAGT S. L.; RENGE, V. C. Epoxidation of vegetable oils: a review. **International Journal of Advanced Engineering Technology**, v. 2, n. 4, p. 491-501, out. 2011.

TRENTINI, Caroline Portilho; MELLO, Bruna Tais Ferreira; CABRAL, Vladimir Ferreira, SILVA, Camila. Crambe seed oil: Extraction and reaction with dimethyl carbonate under pressurized conditions. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 159, p. 104780, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104780>

VALLE, Camila Peixoto; RODRIGUES, Jailson Silva; FECHINE, Lilian Maria Uchoa Dutra; CUNHA, Arcelina Pacheco; MALVEIRA, Jackson Queiroz; LUNA, Francisco Murilo Tavares; RICARDO, Nágila Maria Pontes Silva. Chemical modification of Tilapia oil for biolubricant applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 191, n. 1, p. 158-166, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.062>. Acesso em: 30 jun. 2021.

YILDIRIM, Can; ERCIYES, A. Tuncer; YAGCI, Yusuf. Thermally curable benzoxazine-modified vegetable oil as a coating material. **Journal of Coatings Technology and Reserach**, v. 10, n. 10, p. 559-569, fev. 2013. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9472-8>. Acesso em: 30 jun. 2021.