



PRODUÇÃO DE ÉSTERES DECÍLICOS EPOXIDADOS A PARTIR DE ÓLEOS DE
SOJA (REFINADO E DE FRITURA) E SUAS APLICAÇÕES COMO
PLASTIFICANTES EM FILMES FLEXÍVEIS DE PVC

Sabi, G. J.¹; da Silva, W. A.²; Mendes, A. A.^{1*}

¹Instituto de Química, Universidade Federal de Alfenas, Alfenas – MG, Brasil,
guilherme.sabi@outlook.com, adriano.mendes@unifal-mg.edu.br

¹Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas – MG, Brasil, was@ufsj.edu.br

RESUMO

O presente estudo consiste na produção de novos plastificantes derivados de óleos de soja refinado e de fritura por sequencial hidrólise enzimática dos óleos, esterificação enzimática dos ácidos graxos livres obtidos com decanol e epoxidação *in situ* dos ésteres decílicos obtidos em meio de ácido fórmico e peróxido de hidrogênio. Os filmes de PVC preparados na ausência e presença dos diferentes ésteres avaliados (ésteres decílicos e plastificante comercial – ftalato de dioctila) apresentaram valores similares de espessura (0,066 – 0,080 mm) e gramatura (84,74 – 94,62 g/cm²). O filme sem plastificante apresentou a maior resistência à tração (53,56 MPa) se comparado com os filmes contendo plastificantes (19,72 – 20,74 Mpa). O processo de epoxidação melhorou a resistência à ruptura dos filmes. Estes resultados mostram que os ésteres decílicos epoxidados obtidos de óleo residual possibilitou a preparação de filme de PVC com propriedades similares ao plastificante comercial, uma opção atrativa dos pontos de vista econômico e ambiental.

Palavras-chave: Bioplastificantes, Óleos vegetais, PVC, Caracterização.

ABSTRACT

The present study consists of the production of new plasticizers derived from refined soybean and frying oils by sequential enzymatic hydrolysis, enzymatic esterification of the resulting free fatty acids with decanol and *in situ* epoxidation of the decyl esters in formic acid and hydrogen peroxide medium. The PVC films prepared in the absence

and presence of the different plasticizers (decyl-based esters and commercial plasticizer – dioctyl phthalate) presented similar thickness (0.066 – 0.080 mm) and grammage (84.74 – 94.62 g/cm²) values. The film prepared in the absence of plasticizer presented the highest tensile strength (53.56 MPa), almost three-fold higher than that plasticized PVC films (19.72 – 20.74 MPa). The epoxidation process improved the rupture resistance. These results show that the epoxidized decyl esters obtained from waste oil provided PVC films with properties similar to the commercial plasticizer, an attractive option from the economic and environmental points of view.

Keywords: Bioplasticizers, Vegetable oils, PVC, Characterization.

INTRODUÇÃO

O poli(cloreto de vinila) (PVC) é um polímero amplamente empregado em embalagens de alimentos, construção civil, materiais cirúrgicos e outros campos de produtos dúcteis como plásticos em geral (1). Entretanto, a forte interação entre os grupos C-Cl existentes em sua estrutura restringe a mobilidade da cadeia polimérica, o que o torna quebradiço e resistente à temperatura ambiente. Neste contexto, diferentes aditivos chamados “plastificantes” têm sido adicionados ao PVC durante o seu processamento para aumentar a sua processabilidade e maleabilidade (2). Em geral, estes plastificantes tais como ftalatos, tereftalatos, trimelitados, epóxidos, fosfatos e outros são derivados de combustíveis fósseis como petróleo. Dentre eles, os ftalatos ocupam mais de 80% deste mercado global devido ao baixo custo e excelentes propriedades (1). No entanto, estes diferentes plastificantes estão fisicamente misturados na matriz do PVC por diferentes interações (ligação de hidrogênio, forças de van der Waals, e ligações π , dentre outras) e são liberados durante o seu uso (3–5). Esta liberação pode causar sérios problemas de saúde como câncer, problemas cardiovasculares, diabetes, obesidade e outras doenças (2). Portanto, alternativas mais seguras, sustentáveis e resistentes à migração são necessárias para a indústria do PVC (2–5). Dessa forma, o desenvolvimento de plastificantes “verdes” obtidos de matérias-primas renováveis tem demonstrado ser uma alternativa promissora em termos econômicos e ambientais. Os triacilgliceróis (óleos e gorduras) constituem como uma das principais matérias-primas renováveis para a obtenção de plastificantes com propriedades similares ou melhores que os

plastificantes comerciais obtidos de fontes não renováveis como ftalatos (2–7). Isto é devido à ampla disponibilidade, excelentes propriedades físico-químicas e baixo custo em relação a outros materiais renováveis. Entretanto, a adição direta destes óleos não é apropriada devido à alta massa molecular e hidrofobicidade. Neste contexto, diferentes protocolos de modificações químicas têm sido propostos para melhorar as suas propriedades para posterior aplicação como bioplastificantes tais como transesterificação, epoxidação, esterificação e hidroesterificação, bem como a combinação destes processos (3–8).

Neste contexto, o objetivo deste estudo consiste na aplicação de óleos de soja refinado e processado (fritura) para a produção de novos compostos candidatos à plastificantes (derivados de ésteres decílicos) obtidos pela combinação de diferentes reações químicas. Neste estudo, foi adotada a hidroesterificação para a produção de ésteres decílicos, um processo que consiste na hidrólise enzimática completa dos óleos para a obtenção de ácidos graxos livres (AGL) catalisada por lipase. Em seguida, os AGL obtidos são separados e esterificados com álcool decílico em meios isentos de solventes empregando lipase imobilizada como catalisador (8). Uma terceira etapa foi adotada que consiste na introdução de grupos epóxi via modificação química das duplas ligações existentes na estrutura dos AGL por reação de epoxidação a partir da formação *in situ* do ácido perfórmico (ácido formado pela reação entre ácido fórmico e peróxido de hidrogênio) (4–6). Os diferentes ésteres decílicos obtidos foram testados como plastificantes na preparação de filmes de PVC e seus desempenhos foram comparados com o filme de PVC puro e preparado com plastificante comercial de origem fóssil (ftalato de dioctila – FDO). A aplicação destes ésteres como plastificantes ainda não é reportada na literatura, na qual mostra a novidade deste estudo. Além disso, a execução deste estudo inédito possibilita ampliar a aplicação de enzimas (lipases), catalisadores biológicos que atuam em condições brandas de reação e que minimizam a geração de resíduos devido à alta seletividade e especificidade, em processos de interesse industrial (7,8).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Lipases de *Candida rugosa* (LCR) e de *Thermomyces lanuginosus* (LTL) foram adquiridas da Sigma-Aldrich® Co. (St. Louis, MO, EUA). PVC em pó (massa molecular média de 48.000 g/mol) e ftalato de dioctila (FDO) foram também adquiridos da Sigma-Aldrich. Óleo de soja refinado (Liza) foi adquirido em um mercado local (Alfenas, MG, Brasil) e o óleo de soja usado na produção de batatas fritas foi doado por um restaurante local de *fast-food* local (Alfenas, MG, Brasil). Todos os outros reagentes e solventes orgânicos são de grau analítico fornecidos pela Synth® Ltd (São Paulo, SP).

Procedimento geral de produção dos ésteres candidatos à plastificantes

A produção de AGL por hidrólise completa dos óleos foi conduzida em reator aberto empregando 3,2 g/L da lipase LCR (forma em pó), 50 g de meio na razão mássica óleo:água de 40% (m/m), agitação mecânica de 1500 rpm, 40°C e tempo de reação de 3 h (8). Os AGL obtidos foram separados em funil de separação, lavados com água destilada e desidratados com Na₂SO₄ anidro a 25 °C.

A produção de ésteres decílicos via esterificação de AGL e decanol em reatores abertos foi realizada usando a lipase LTL imobilizada em Octil-SiO₂ sob condições estabelecidas em um estudo anterior (8): razão molar estequiométrica decanol:AGL, agitação mecânica de 240 rpm, 40°C e 5 mg de lipase imobilizada por grama da mistura de reação. A porcentagem máxima de conversão de AGL da ordem de 86% para ambos os óleos foi obtida após 90 min de reação. Os ésteres decílicos resultantes foram também separados em funil de separação, lavados com água destilada a 50°C e desidratados em Na₂SO₄ anidro a 20% em massa a 25 °C.

A epoxidação *in situ* dos ésteres decílicos obtidos foi realizada conforme metodologia proposta por WANG *et al.* (6). 20 g de cada éster (0,06 mol) foram adicionados a um frasco de propileno de 350 mL sob agitação (1500 rpm) equipado com um agitador mecânico contendo 10,4 g de água destilada. O sistema foi então imerso em um banho-maria a 55 °C, seguido da adição de 4,32 g de solução de ácido fórmico 85% m/m e de 2,5 g de solução de H₂O₂ a 50% m/m. A mistura foi mantida por 4 h e a fase orgânica (ésteres decílicos epoxidados) foi separada em funil de separação, lavados com água destilada a 50°C e desidratados em Na₂SO₄ anidro a 20% em massa a 25 °C.

Caracterização dos ésteres (epoxidados e não-epoxidados) produzidos

O índice de iodo foi determinado como proposto pela American Society for Testing and Materials – ASTM D5554-95 (9). A porcentagem de conversão das insaturações ($X - \%$) foi calculada conforme metodologia descrita por WANG *et al.* (6). As porcentagens teórica (CO_{teor}) e experimental (CO_{exp}) de grupos epóxi introduzidos nas amostras foi calculada de acordo com SUZUKI *et al.* (5). O rendimento do processo de oxidação ($Y - \%$), relação entre os valores de CO_{exp} e CO_{teor} , foi também calculado de acordo com SUZUKI *et al.* (5).

Preparação dos filmes de PVC

Os filmes flexíveis de PVC foram preparados pela metodologia de moldagem com evaporação de solvente orgânico – método *casting* (4). 400 mg de PVC em pó foram adicionados em frascos fechados de 100 mL contendo 10 mL de tetrahidrofurano (THF). A solução foi mantida sob constante agitação magnética (500 rpm) a 25°C por 30 min. Após a solubilização do PVC, foram adicionados 160 mg de cada plastificante (ésteres decílicos produzidos e FDO). Em seguida, a solução polimérica foi introduzida em placas de Petri com diâmetro de 9 cm e coberta com vidro de relógio para a evaporação controlada do solvente. Os sistemas permaneceram por 72 h a 25°C sob repouso em capela de exaustão para completa evaporação do solvente e formação da rede polimérica.

Caracterização dos filmes preparados

A espessura e gramatura dos filmes preparados (dimensões de 10 × 10 mm) foram determinadas de acordo com ASTM D4635-16 (10). Propriedades mecânicas como resistência à tração e à perfuração (ou punctura) foram determinadas para amostras dos filmes com dimensões de 10 × 90 mm em um analisador de textura (TAXT2plus, Stable Micro Systems, Godalming, Reino Unido) também de acordo com metodologias padrões – ASTM D882-18 (11) para resistência à tração e ASTM D2582-21 (12) para a resistência à perfuração, respectivamente.

As imagens de microscopia de força atômica dos diferentes filmes de PVC foram obtidas usando um microscópio Bruker Multimode 8 Veeco (Bruker Corporation, Billerica, MA, EUA) com área superficial escaneada de 50 × 50 μm .

Análise estatística

Os dados experimentais foram representados como média \pm desvio de três replicações ($n = 3$). A análise estatística foi realizada para determinar diferenças estatisticamente significativas entre as médias ($p < 0,05$) usando o software Sisvar versão 5.6, Build 90 (<https://des.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização química de ésteres de base decil por diferentes técnicas

A caracterização química dos ésteres decílicos produzidos a partir dos óleos de soja refinado (OSR) e usado em fritura (OF) foi realizada de acordo com métodos padrão e os resultados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas dos diferentes ésteres decílicos produzidos.

Samples	II ^a (mgI ₂ por 100 g)	X ^b (%)	CO _{teor.} ^c (%)	CO _{exp.} ^d (%)	Y ^e (%)
ED-OSR ^f	88,8 \pm 0,3	-	-	-	-
EDE-OSR ^g	51,1 \pm 0,2	42,5 \pm 0,1	5,3 \pm 0,2	1,9 \pm 0,1	36,1 \pm 0,2
ED-OF ^h	87,7 \pm 0,5	-	-	-	-
EDE-OF ⁱ	50,7 \pm 1,9	42,1 \pm 1,0	5,2 \pm 0,1	1,8 \pm 0,2	35,4 \pm 0,1

a – índice de iodo; b – conversão; c – máxima concentração teórica de grupos epóxi; e – máxima concentração experimental de grupos epóxi; f – Rendimento em grupos epóxi introduzidos.

f – ésteres decílicos de óleo de soja refinado; g – ésteres decílicos epoxidados de óleo de soja refinado;

h – ésteres decílicos de óleo de fritura; i – ésteres decílicos epoxidados de óleo de fritura.

De acordo com esses resultados, foram obtidas conversões semelhantes de ligações duplas ($-C=C-$) presentes nas cadeias carbônicas dos ésteres resultantes (valores de índice de iodo – II) e densidade de grupos epóxi introduzidos em suas estruturas químicas (valores de rendimento – Y). Os ésteres decílicos obtidos por

hidroesterificação (sequencial hidrólise e esterificação) têm valores de II , um parâmetro utilizado para determinar o número de ligações duplas, em torno de $88 \text{ mg}_{\text{I}_2}$ por 100 g de amostra. Como esperado, uma redução da ordem de 42% dos valores originais (de $88 \text{ mg}_{\text{I}_2}$ por 100 g de ésteres para $51 \text{ mg}_{\text{I}_2}$ por 100 g) após o processo de epoxidação *in situ* pode ser observada devido à conversão parcial de ligações duplas em grupos epóxi. De fato, semelhantes valores de rendimento da ordem de 35% foram obtidos. Estes resultados confirmam a introdução de grupos polares (epóxi) na estrutura dos ésteres decílicos obtidos pelo processo de epoxidação *in situ* adotado.

Caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos filmes de PVC

As propriedades físicas (gramatura e espessura) e mecânicas (resistência à tração e perfuração) dos diferentes filmes preparados estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades físicas dos filmes de PVC preparados na ausência e presença de plastificantes comercial (FDO) e produzidos neste estudo.

Amostras	Espessura (μm)	Gramatura (g/m^2)	Tensão de cisalhamento (MPa)	de Ruptura (N)
PVC-puro	$70,16 \pm 4,74^a$	$89,00 \pm 5,42^{ba}$	$53,56 \pm 3,37^a$	$42,83 \pm 3,88^a$
PVC-FDO ^d	$80,12 \pm 6,81^a$	$94,62 \pm 7,37^a$	$16,46 \pm 3,42^b$	$33,57 \pm 5,45^{ba}$
PVC-ED _{OSR} ^e	$75,20 \pm 4,38^a$	$86,58 \pm 5,95^{ba}$	$19,92 \pm 2,78^b$	$18,85 \pm 1,08^c$
PVC-EDE _{OSR} ^f	$79,40 \pm 6,14^a$	$86,28 \pm 6,17^{ba}$	$19,72 \pm 2,02^b$	$23,29 \pm 4,47^{cb}$
PVC-ED _{OF} ^g	$70,37 \pm 4,84^a$	$86,94 \pm 5,84^{ba}$	$20,74 \pm 2,29^b$	$18,79 \pm 1,31^c$
PVC-EDE _{OF} ^h	$72,20 \pm 3,94^a$	$84,74 \pm 7,14^b$	$20,16 \pm 1,98^b$	$22,77 \pm 2,01^{cb}$

Valores representados como média \pm desvio ($n = 3$). Parâmetros (a – c) indicam a significância dos resultados experimentais ($p < 0,05$). d – Ftalato de dioctila; e – ésteres decílicos de óleo de soja refinado; f – ésteres decílicos epoxidados de óleo de soja refinado; g – ésteres decílicos de óleo de fritura; h – ésteres decílicos epoxidados de óleo de fritura.

Os parâmetros de gramatura e espessura expressam a densidade dos sólidos dos filmes (10). De acordo com os resultados, a espessura dos diferentes filmes não foi influenciada pela incorporação de plastificantes (valores de $p > 0,05$). Analisando os resultados referentes à gramatura, não houve diferença entre os diferentes filmes,

com exceção da amostra obtida com ésteres decílicos epoxidados produzidos a partir de óleo residual (EDE-OF). No entanto, todos os filmes de PVC plastificados com os ésteres decílicos sintetizados foram estatisticamente semelhantes ao filme de PVC puro. Em geral, esses dados não mostram mudanças significativas nos teores de sólidos dos diferentes filmes preparados devido à possível elevada dispersão e interação dos diferentes plastificantes com a estrutura do PVC.

A influência da incorporação dos diferentes materiais plastificantes (plastificante comercial e sintetizados à base de ésteres decílicos) nas propriedades mecânicas dos filmes de PVC como resistência à tração e resistência à perfuração foi também avaliada. A resistência à tração (dimensão da força por unidade de área) é um parâmetro que expressa a razão entre a carga máxima que um determinado material pode suportar sem ruptura (quando esticado) e sua área seccional original (11). Este parâmetro tem sido amplamente utilizado para obter características mecânicas de uma ampla variedade de materiais poliméricos para aplicações em filmes, incluindo PVC (3–5,7). As propriedades mecânicas dos diferentes filmes contendo o plastificante comercial (FDO) e os ésteres decílicos produzidos (epoxidados e não-epoxidados) foram comparadas com o filme de PVC puro, conforme mostrado na Tabela 2. Como esperado, o maior valor de resistência à tração foi obtido para o filme de PVC puro ($53,56 \pm 3,37$ MPa). De fato, esse valor foi entre 2,6 a 3,25 vezes maior que os filmes plastificados (variando de $16,46 \pm 3,42$ a $20,74 \pm 2,29$ MPa). É importante ressaltar que não foi observada mudança significativa entre os diferentes plastificantes ($p < 0,05$). Em geral, materiais com alta resistência à tração, neste caso o filme de PVC puro, tendem a ter baixo grau de deformação devido às suas estruturas mais rígidas e, portanto, são menos capazes de sofrer deformação sem romper (3,7). Portanto, os diferentes filmes plastificados são mais flexíveis, exibindo maiores níveis de alongamento antes da fratura. A incorporação dos ésteres resultantes reduz possíveis interações intermoleculares entre cadeias de PVC, melhorando assim sua flexibilidade e processabilidade (2). Esses resultados indicam que os plastificantes de base biológica sintetizados a partir de óleos de soja refinado e usado (fritura) fornecem filmes com deformação plástica interessante antes da fratura (ductilidade), um parâmetro físico importante para agentes plastificantes.

Testes de perfuração (punctura) também foram realizados para fornecer informações técnicas sobre a capacidade dos diferentes filmes de suportar a

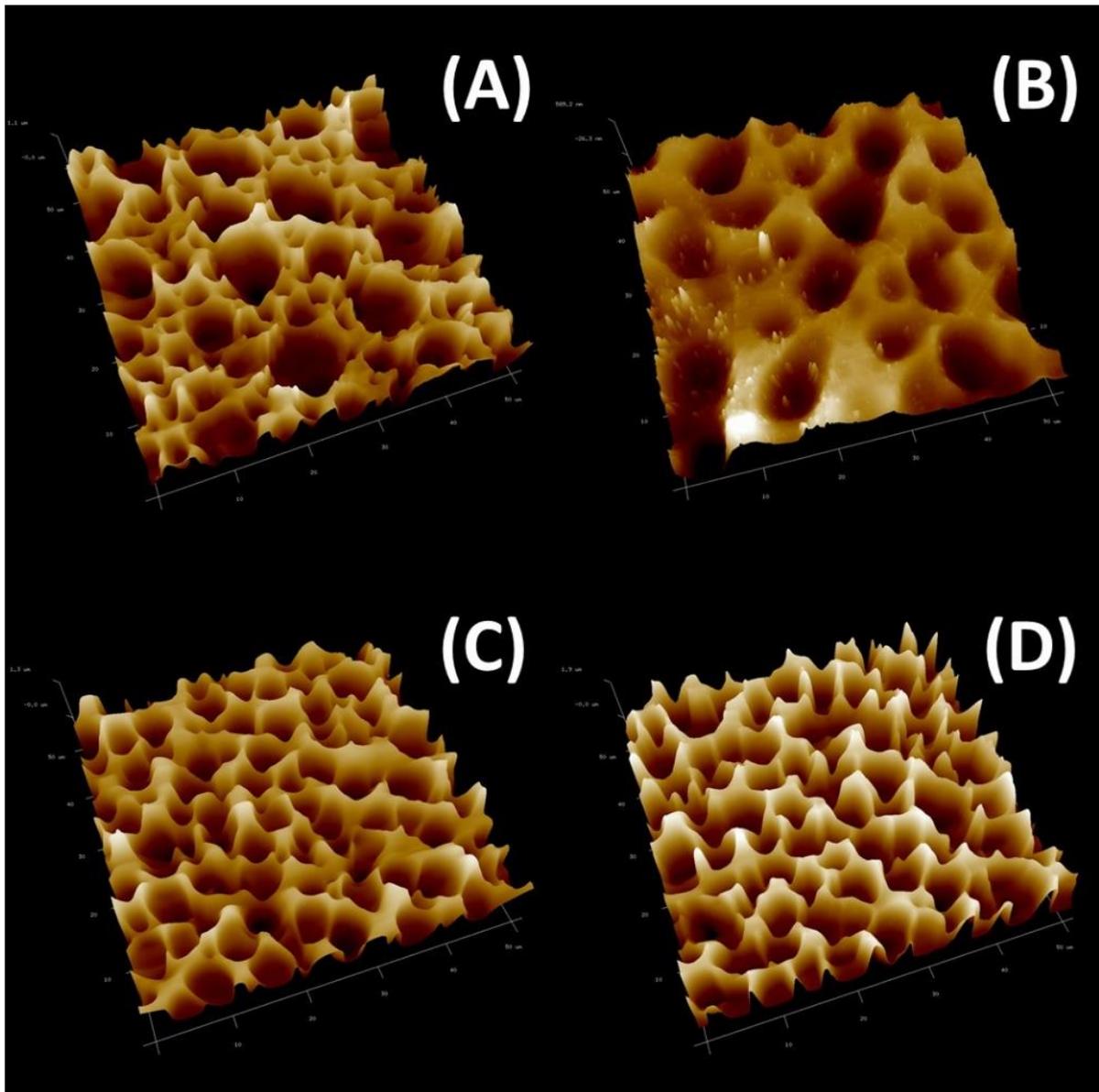
penetração com um objeto pontiagudo. A resistência máxima à perfuração também foi alcançada usando filme de PVC puro ($42,83 \pm 3,88$ N), seguido por filme de PVC plastificado com FDO ($33,57 \pm 5,45$ N), que foi estatisticamente semelhante aos filmes preparados com ésteres epoxidados (em torno de 23 N) – ver Tabela 2. Ésteres decílicos não epoxidados forneceram filmes com a menor resistência à perfuração (em torno de 19 N), porém nenhuma diferença estatística foi observada quando comparados aos ésteres epoxidados. Esses resultados sugerem que a presença de anéis aromáticos (para FDO) e grupos epóxi introduzidos nas estruturas dos ésteres decílicos podem fornecer melhor resistência à perfuração aos filmes de PVC.

Morfologia da superfície dos filmes de PVC produzidos

A morfologia da superfície dos filmes de PVC obtidos com os plastificantes sintetizados neste estudo foi investigada por MFA, conforme mostrado na Figura 2. Imagens topográficas de filmes de PVC puro têm revelada a formação de superfícies lisas e planas (3). No entanto, filmes de PVC preparados com plastificantes comerciais e obtidos a partir de matérias-primas de base biológica, incluindo ésteres monoalquílicos de óleos vegetais, resultam na formação de superfícies irregulares e distribuição uniforme de estruturas nodulares em suas superfícies (3,7). Estes resultados estão de acordo com os obtidos neste estudo para os filmes produzidos com os novos plastificantes sintetizados (derivados de ésteres decílicos) que demonstram a formação de filmes de PVC com distribuição e dispersão uniformes. Curiosamente, os plastificantes de base biológica produzidos a partir de óleo residual (OF – ver Figuras 1(C) e 1(D)) forneceram filmes de PVC mais uniformes e com melhor dispersão do que àqueles preparados com ésteres decílicos de óleo refinado – ver Figuras 1(A) e 1(B). De fato, o filme de PVC preparado com ésteres decílicos epoxidados de óleo refinado (ED-OSR – Figura 1(B)) exibiu os maiores diâmetros de nódulos devido à sua possível alta agregação durante o processo de plastificação do filme. Esses resultados indicam que a possível presença de compostos oxidados pré-existentes na composição do OF, gerados durante o processo de fritura, pode resultar em sua melhor interação com o PVC. Como esperado, os diferentes grupos polares (ésteres e/ou grupos epóxi) introduzidos na estrutura dos ésteres produzidos, confirmados pela caracterização química, resultaram na satisfatória interação e

dispersão com a estrutura do PVC, o que possibilita a formação de filmes com excelentes propriedades físicas e mecânicas (elevada flexibilidade e processamento).

Figura 1. Imagens de microscopia de força atômica para os filmes de PVC preparados com ésteres decílicos de óleo de soja refinado (A), ésteres decílicos epoxidados de óleo de soja refinado (B), ésteres decílicos de óleo de fritura (C), e ésteres decílicos epoxidados de óleo de fritura (D).



CONCLUSÃO

O processo de epoxidação *in situ* foi necessário para melhorar a incorporação e uniformidade dos ésteres obtidos (confirmada por MFA) com a estrutura do PVC, o

que possibilita obter filmes com propriedades mecânicas bastante semelhantes aos obtidos com o plastificante comercial (FDO). Essa boa interação pode também reduzir a liberação da estrutura do PVC. Este estudo indica a promissora aplicação do óleo residual na preparação de bioplastificantes, uma opção tecnologicamente limpa para a produção de importantes aditivos na indústria química.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à FAPEMIG (Processo APQ–01691–21) e ao CNPq (Processo 306253/2023–2) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- (1) MARKETS AND MARKETS, 2023. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/plasticizers-market-688.html>. Acessado em 10 de agosto de 2024.
- (2) ALHANISH A.; GHALIA A. M. Developments of biobased plasticizers for compostable polymers in the green packaging applications. BIOTECHNOLOGY PROGRESS, v. 37, p. e3210, 2021. <https://doi.org/10.1002/btpr.3210>
- (3) HUANG, W.; NAN, H.; MA, J.; DONG, K.; ZHANG, J.; LIU, G.; WU, J.; XUE, C.; XU, S.; ZHONG, H. Synthesis and properties of bio-based environmental plasticizer derived from oleic acid for poly (vinyl chloride). JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE, v. 141, p. e55572, 2024. <https://doi.org/10.1002/app.55572>
- (4) PATIL S.S.; JENA H.M. Performance assessment of polyvinyl chloride films plasticized with *Citrullus lanatus* seed oil based novel plasticizer. POLYMER TESTING, v. 101, p. 107271, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107271>
- (5) SUZUKI A.H., BOTELHO B.G.; OLIVEIRA L.S.; FRANÇA A.S. Sustainable synthesis of epoxidized waste cooking oil and its application as a plasticizer for

polyvinyl chloride films. EUROPEAN POLYMER JOURNAL., v. 99, p. 142–149, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.12.014>

(6) WANG J.; ZHAO X.; LIU D. Preparation of epoxidized fatty acid methyl ester with *in situ* auto-catalysed generation of performic acid and the influence of impurities on epoxidation. WASTE AND BIOMASS VALORIZATION, v. 9, p. 1881–1891, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-9945-6>

(7) MUKHERJEE, S.; GHOSH, M. Ghosh, Studies on performance evaluation of a green plasticizer made by enzymatic esterification of furfuryl alcohol and castor oil fatty acid, CARBOHYDRATE POLYMERS, v. 157, p. 1076–1084, 2017.
<https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.10.075>

(8) SABI, G. J.; GAMA, R. S.; FERNANDEZ-LAFUENTE, R.; CANCINO-BERNARDI, J.; MENDES, A. A. Decyl esters production from soybean-based oils catalyzed by lipase. ENZYME AND MICROBIAL TECHNOLOGY, v. 157, p. 110019, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2022.110019>

(9) ASTM D5554-95 – Standard Test Method for Determination of the Iodine Value of Fats and Oils. <https://www.astm.org/d5554-95.html>.

(10) ASTM D4635-16 – Standard Specification for Plastic Films Made from Low-Density Polyethylene and Linear Low-Density Polyethylene for General Use and Packaging Applications. <https://www.astm.org/d4635-16.html>.

(11) ASTM D882-18 – Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. <https://www.astm.org/standards/d882>.

(12) ASTM D2582-21 – Standard Test Method for Puncture-Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting. <https://www.astm.org/d2582-21.html>.