

Espalhamento e secagem de filme de amido-glicerol-fibra preparado por “tape-casting”

Jaqueline Oliveira de Moraes⁽¹⁾, Andressa Reszka⁽¹⁾ e João Borges Laurindo⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Campus Trindade, CEP 88040-900 Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: jaquelinemoraes111@gmail.com, andressarezska@gmail.com, joao@enq.ufsc.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar processos de espalhamento e secagem de filme de amido-glicerol-fibras de celulose, preparado por “tape-casting”. O espalhamento da suspensão foi avaliado a 50, 150 e 250 cm min⁻¹, seguido de secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 40 ou 70°C; avaliou-se também o espalhamento da suspensão a 150 cm min⁻¹, seguido da secagem do filme sobre suporte de “tape-casting” a 22°C e 60% de umidade relativa, com velocidades do ar de 4, 6 e 8 m s⁻¹ no túnel de secagem. Ensaio reológicos mostraram que o espalhamento das suspensões a temperaturas inferiores a 50°C apresentou módulo de elasticidade superior ao módulo viscoso, em todo o espectro de frequências de oscilação. As microscopias mostraram filmes secos a 40 e 70°C sem defeitos de formação, e cujas propriedades mecânicas não diferiam. A velocidade de espalhamento e a do ar não modificam o tempo de secagem nem as propriedades dos filmes. O tempo de secagem pode ser reduzido para aproximadamente duas horas, o que é importante para a produção dos filmes em larga escala.

Termos para indexação: biopolímero, curva de secagem, escala de produção, filmes biodegradáveis, filmes de amido, propriedades mecânicas.

Spreading and drying of starch-glycerol-fiber film produced by tape-casting

Abstract – The objective of this work was to evaluate spreading and drying processes of starch-glycerol-cellulose fiber film prepared by tape-casting. Suspension spreading was evaluated at 50, 150 and 250 cm min⁻¹, followed by drying in a forced-air oven at 40 or at 70°C; suspension spreading was also evaluated at 150 cm min⁻¹, followed by film drying on the tape-casting support at 22°C and 60% relative humidity, at air-drying velocity of 4, 6, and 8 m s⁻¹ in the drying tunnel. Rheological tests showed that suspension spreading at temperatures below 50°C had the modulus of elasticity superior to the modulus of viscosity, in all oscillation frequency spectrum. Micrographs showed films dried at 40 and 70°C without defects and whose mechanical properties showed no differences. Spreading speed and air-drying velocities did not change the drying time and film properties. The drying time can be reduced to approximately two hours, which is important to the scale-up of film production.

Index terms: biopolymer, drying rate, production scale, biodegradable films, starch films, mechanical properties.

Introdução

A utilização de polímeros naturais e renováveis para a produção de filmes destinados à fabricação de embalagens é uma solução inovadora e ecológica, pois pode auxiliar no manejo do ciclo de carbono e na redução do uso de plásticos derivados do petróleo. Os filmes de amido têm sido intensamente analisados, pois são candidatos promissores à substituição parcial dos polímeros sintéticos, principalmente em razão da disponibilidade e do baixo custo dos amidos. No entanto, em razão da natureza hidrofílica deste biopolímero, os materiais produzidos apresentam alta permeabilidade ao vapor de água e propriedades mecânicas inferiores,

em comparação aos materiais sintéticos. Uma opção para a melhoria dessas propriedades tem sido a incorporação de outros materiais aos filmes, como as fibras de celulose, que também são biodegradáveis (Müller et al., 2009; Moraes et al., 2013).

A técnica de “tape-casting” (também conhecida como “spread-casting” ou “knife-coating”) é bem conhecida na indústria cerâmica, de papel, de plásticos e de tintas. No processo de “tape-casting”, uma suspensão é colocada em um reservatório com uma lâmina niveladora, chamada de “doctor-blade”, cuja altura pode ser ajustada com parafusos micrométricos (Mistler & Twiname, 2000). A suspensão é moldada como uma camada fina sobre um suporte (fita

polimérica), em decorrência do movimento do suporte (processo contínuo) ou do movimento da lâmina (processo descontínuo). A velocidade de espalhamento utilizada depende das características da suspensão e da configuração da lâmina niveladora, como altura do espalhador e volume do reservatório (Moraes et al., 2013). O método de “tape-casting” é um processo promissor para o aumento de escala na produção de filmes biodegradáveis, pois pode aproveitar o que já foi desenvolvido para as indústrias cerâmicas e de papel (Moraes et al., 2013).

A avaliação das propriedades reológicas das suspensões formadoras de filmes é importante, pois elas serão transportadas e processadas. Suspensões que são submetidas ao processo de “tape-casting” devem apresentar comportamento pseudoplástico (Gardini et al., 2010), que é o caso de suspensões de amido-glicerol-fibras de celulose, conforme relatado por Moraes et al. (2013). Fluidos não newtonianos devem ser caracterizados não só pela viscosidade, mas também pela viscoelasticidade. Ensaio oscilatórios vêm sendo muito utilizados na caracterização de materiais poliméricos. Nesses ensaios, é possível separar a contribuição elástica da contribuição viscosa do polímero em relação ao tempo ou à frequência (Canevarolo Junior, 2004). A avaliação da variação dos módulos viscoelásticos de armazenamento (G') e de perda (G'') com a frequência de oscilação (ω) permite inferir sobre a organização macromolecular de um sistema. Em geral, para soluções diluídas de polissacarídeos a baixas frequências de oscilação, o caráter viscoso do sistema é muito elevado. À medida que a concentração do polissacarídeo ou a frequência de oscilação aumenta, G' e G'' aumentam, e a componente elástica da amostra pode superar a componente viscosa (Ross-Murphy, 1994).

Há interesse que se reduza o tempo de secagem e o consumo de energia na produção dos filmes, sem que os mesmos percam qualidade, como por exemplo, em suas propriedades mecânicas. Elevadas taxas de secagem podem conduzir à formação de grandes gradientes de concentração e formar uma camada superficial vítrea, com a presença de uma zona central do filme com alto teor de umidade. O aumento da temperatura aumenta a pressão de vapor, o que pode levar à formação de bolhas, que prejudicam consideravelmente a qualidade do filme (Czaputa et al., 2011). Embora a maioria dos estudos relate a secagem da suspensão à temperatura

ambiente ou em estufas com circulação forçada de ar com temperaturas moderadas, há trabalhos recentes que têm mostrado que é possível reduzir esse tempo de secagem (Moreira et al., 2011; Reis et al., 2013; Moraes et al., 2013). Tápia-Blácido et al. (2013) elaboraram filmes por “casting” e secaram as suspensões de amido-glicerol e amido-sorbitol, por convecção, a diferentes temperaturas, 25,9 a 54,1°C, e umidade relativa (UR) de 33,8 a 76,2%. Os autores verificaram que a velocidade de secagem influenciou as propriedades mecânicas e a solubilidade dos filmes. As condições otimizadas de secagem foram de 50°C a 76,2% UR e a 35°C e 70,3% UR, para os filmes plastificados com glicerol e sorbitol, respectivamente. Curvas experimentais de secagem são importantes, pois contêm informações de difícil predição teórica. Após a suavização dos dados experimentais da curva de secagem, as curvas são derivadas para calcular as taxas de secagem em função do teor de umidade e do tempo (Kemp et al., 2001).

O objetivo deste trabalho foi avaliar processos de espalhamento e secagem de filme de amido-glicerol-fibras de celulose, preparado por “tape-casting”.

Material e Métodos

Utilizou-se o amido de mandioca da Yoki Alimentos S.A., adquirido na rede local de supermercados de Florianópolis, SC. Como plastificante, utilizou-se o glicerol de grau analítico (Nuclear, Diadema, São Paulo, SP, Brasil). Os experimentos foram realizados no laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos (Profi), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As fibras utilizadas foram fibras longas de celulose (Klabin S.A., Brasil).

Elaborou-se a suspensão de amido-glicerol-fibras de celulose com 3 g de amido por 100 g de suspensão, 0,30 g de fibra por grama de amido seco e 0,20 g de glicerol por grama de amido seco, conforme proposto por Moraes et al. (2013).

Para se obter a suspensão de fibras, 10 g de fibras foram misturados com 300 mL de água destilada, durante 24 h, para hidratação. A suspensão de fibras foi agitada durante 10 min a 14.000 rpm, em homogeneizador de bancada, antes da adição do amido e do glicerol. O recipiente com a mistura foi aquecido e agitado de modo constante até 71°C, em banho

termostático (Tecnal, Piracicaba, SP, Brasil), e mantido a esta temperatura por 5 min. Os ensaios reológicos foram realizados com a suspensão pré-gelatinizada de amido-glicerol-fibras, em reômetro de placas planas (Haake Mars III, Thermo Scientific, Karlsruhe, Alemanha), com taxa de cisalhamento de 10 s^{-1} (fase linear), com variação da frequência de 0,1 a 100 rad, à taxa de 10 rad s^{-1} , nas temperaturas de 25, 30, 40, 50, 60 e 70°C . O suporte utilizado para espalhamento da suspensão foi um conjunto de placas de vidro, de $15 \times 15 \text{ cm}$, enfileiradas sobre a mesa de “tape-casting”, recobertas com filme de Mylar (DuPont Teijin Films, Hopewell, VA, EUA) para facilitar a posterior retirada dos filmes secos. A lâmina niveladora foi utilizada com abertura de 3,0 mm, largura de 10 cm e reservatório com inclinação de 45° , acoplado a um motor que permitia o espalhamento da suspensão a velocidade controlada. Para todos os filmes, a suspensão foi espalhada a 50°C .

Foram avaliados dois procedimentos de preparação dos filmes: a velocidades de espalhamento de 50, 150 e 250 cm min^{-1} , com secagem da suspensão a 40°C e 70°C , até massa constante, em estufa de circulação e renovação de ar (modelo MA035/1, Tecnal, Piracicaba, SP, Brasil); e à velocidade de espalhamento de 150 cm min^{-1} , com secagem do filme sobre o próprio suporte de espalhamento, com fluxo do ar no túnel de secagem do equipamento de “tape-casting”. A temperatura e a UR do ar ambiente foram medidas com um termo-higrômetro portátil (Testo 610, Alemanha), e variaram de 20 a 22°C e de 60 a 65%, respectivamente. A influência da velocidade do ar sobre a cinética de secagem também foi avaliada, às velocidades de 4, 6 e 8 m s^{-1} , medidas com um anemômetro digital portátil Testo 425 (Alemanha). As curvas de secagem foram determinadas em triplicata, por meio da aferição da massa da amostra a cada 5 min, em balança semianalítica (AS2000C, São Paulo, SP, Brasil).

Os dados experimentais da secagem foram suavizados por uma função “smoothing spline”, do Matlab. A função suavizada foi derivada para calcular as curvas de taxa de secagem. No primeiro período de secagem, quando o filme ainda estava bastante úmido, uma função linear foi ajustada aos dados experimentais para avaliar a extensão do período à taxa constante, tendo-se utilizado o valor do coeficiente de correlação $R^2 > 0,99$ como critério.

As espessuras dos filmes foram determinadas com micrômetro digital (Mitutoyo Co., Kawasaki, Japão), em diferentes regiões de cada amostra. Os ensaios de tração foram realizados em texturômetro TA-XT2i, (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido). Antes dos testes, os filmes foram cortados em corpos de prova, com 25 mm de largura e 100 mm de comprimento, e acondicionados a 25°C e 58% UR, durante 48 horas, conforme norma D882-02 da ASTM (ASTM International, 2002).

A permeabilidade ao vapor d’água (PVA) foi determinada gravimetricamente pelo método estacionário-padrão da ASTM, E96-95, descrito por Sarantópoulos et al. (2002). Os discos de filmes com $0,0033 \text{ m}^2$ foram aplicados em cápsulas com cloreto de cálcio (CaCl_2) a 2% UR, vedadas por anel de vedação. Todo o conjunto foi condicionado a 25°C , em uma câmara com 75% UR (solução saturada de NaCl).

As análises de microscopia eletrônica de varredura (Philips XL-30) foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC. Os filmes secos foram cortados, colados em “stubs” e recobertos com uma camada de ouro, por meio de um metalizador (Baltec SCD 0005) e de um feixe de elétrons de aproximadamente 10 kV. Foram realizadas micrografias da superfície exposta ao ar de secagem e da fratura dos materiais.

Os experimentos foram realizados em triplicatas ou com mais repetições, como no caso das propriedades mecânicas, para as quais foram realizadas pelo menos 10 repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com o programa Statistica 7.0 (StatSoft, Tulsa, EUA).

Resultados e Discussão

O comportamento reológico da suspensão de amido-glicerol-fibras de celulose, nas diferentes frequências de oscilação e temperaturas, foi típico de fluídos viscoelásticos (Figura 1). Para suspensões com temperaturas de até 50°C , observou-se que o módulo de elasticidade (G') foi superior ao módulo viscoso G'' , em todo o espectro de frequências de oscilação avaliado, o que, de acordo com Kavanagh et al. (2000), mostra a importância da componente elástica da suspensão. Nas temperaturas acima de 50°C , ocorreu um cruzamento das curvas, em uma estreita faixa de frequências (0,01, 0,02 e $0,03 \text{ rad s}^{-1}$, para 50, 60 e

70°C). A baixas frequências, G'' foi superior a G' , o que indica que a preparação dos filmes por “tape-casting” deve ser realizada à temperatura igual ou inferior a 50°C.

O processo de espalhamento da suspensão sobre o suporte funcionou de maneira adequada para as duas maiores velocidades (150 e 250 cm min^{-1}). No entanto, o escoamento espontâneo da suspensão prejudicou o processo realizado à velocidade de 50 cm min^{-1} . Os tempos de secagem a temperaturas de 40 para 70°C foram de 250 e 115 min, respectivamente, tendo-se

considerado o final da secagem quando as amostras atingiram 0,15 g g^{-1} (Figura 2 A e C)

Após um pequeno período de adaptação da temperatura de suspensão, as curvas de secagem a 40°C apresentaram dois períodos distintos de secagem (Figura 2 B). No primeiro, observou-se secagem à taxa constante, em que predominou a evaporação da água livre na superfície do material. No segundo, a taxa foi decrescente, o que, segundo Geankoplis (1993), é uma indicação de que a migração interna da umidade para a superfície não conseguiu suprir a taxa de evaporação

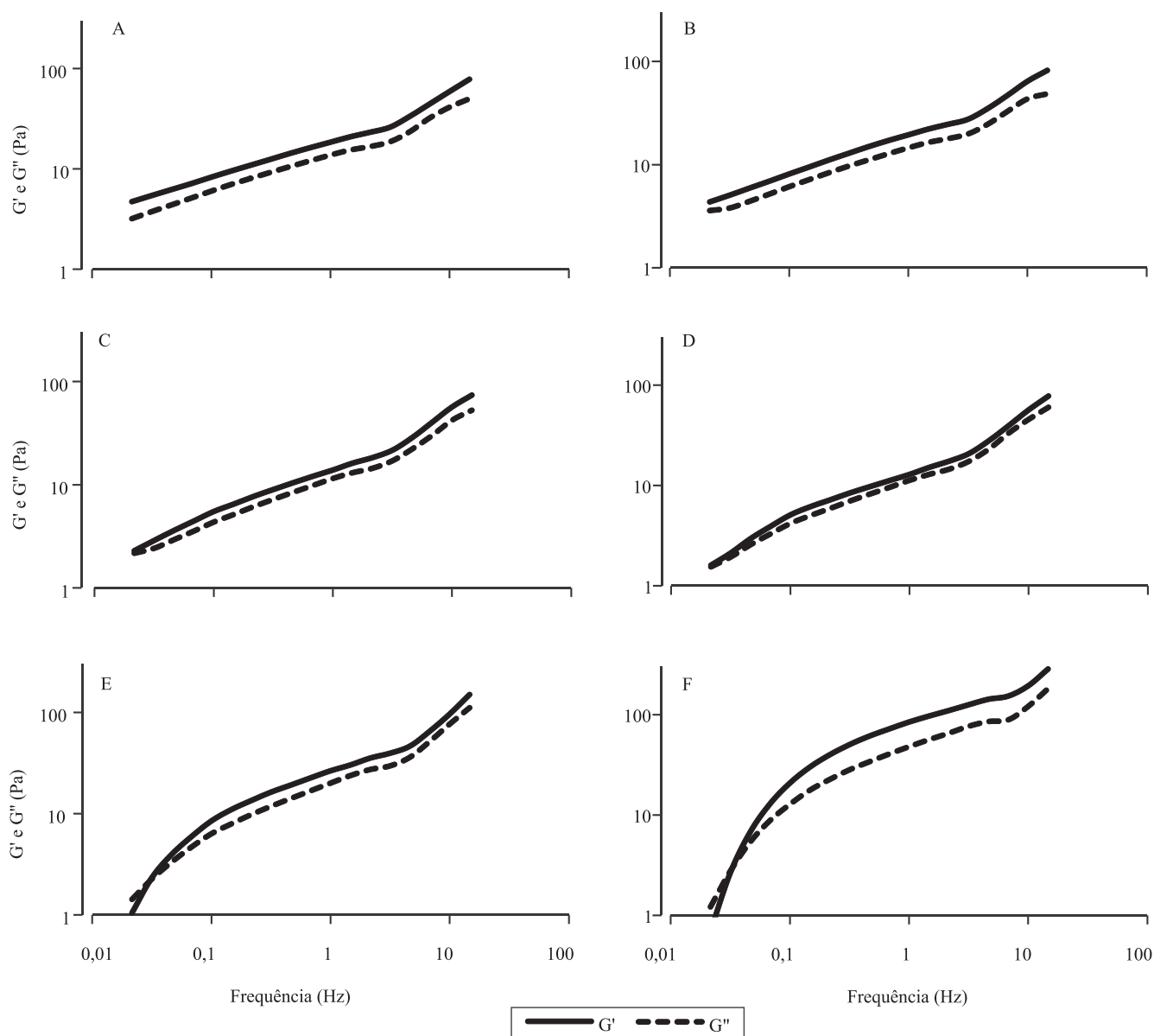


Figura 1. Influência da frequência no módulo de elasticidade (G') e no módulo viscoso (G''), para a suspensão amido-glicerol-fibras de celulose a: A, 25°C; B, 30°C; C, 40°C; D, 50°C; E, 60°C; e F, 70°C.

na superfície. Esse comportamento foi relatado por outros autores para filmes de biopolímeros com glicerol (Daud & Armstrong, 1988; Moreira et al., 2011; Reis et al., 2013). Nas curvas realizadas a 70°C, também foram observados os períodos à taxa constante e à taxa decrescente (Figura 2 D).

À temperatura de 70°C, os valores das taxas de secagem constantes foram 2,5 vezes maiores do que os encontrados para os filmes secos a 40°C (Tabela 1). O valor de umidade crítica – transição entre o período à taxa constante e o período à taxa decrescente – esteve entre 80 e 90% (base úmida). O tempo total de secagem foi 2,3 vezes maior, a 40°C (115 min), do que a 70°C (65 min). Moreira et al. (2011), Tápia-Blácido et al. (2013) e Reis et al. (2013) relataram resultados semelhantes. O período de secagem à taxa constante representou, aproximadamente, metade do tempo

total de secagem. A velocidade de espalhamento da suspensão não modificou a cinética de secagem, o que está associado à baixa concentração de sólidos na suspensão.

As fibras apresentaram-se homogêneas dispersas na matriz de amido, conforme previamente descrito por Müller et al. (2009). As micrografias dos filmes secos a diferentes temperaturas não diferiram entre si (Figura 3).

A espessura dos filmes de amido obtidos, de suspensões espalhadas a diferentes velocidades da lâmina niveladora, variou entre 110 e 140 μm . Em geral, os menores valores foram observados nos filmes secos a menores temperaturas (Tabela 2).

As tensões de ruptura dos filmes secos a 70°C foram pouco maiores do que as observadas nos filmes secos a 40°C. O alongamento da ruptura dos filmes secos a

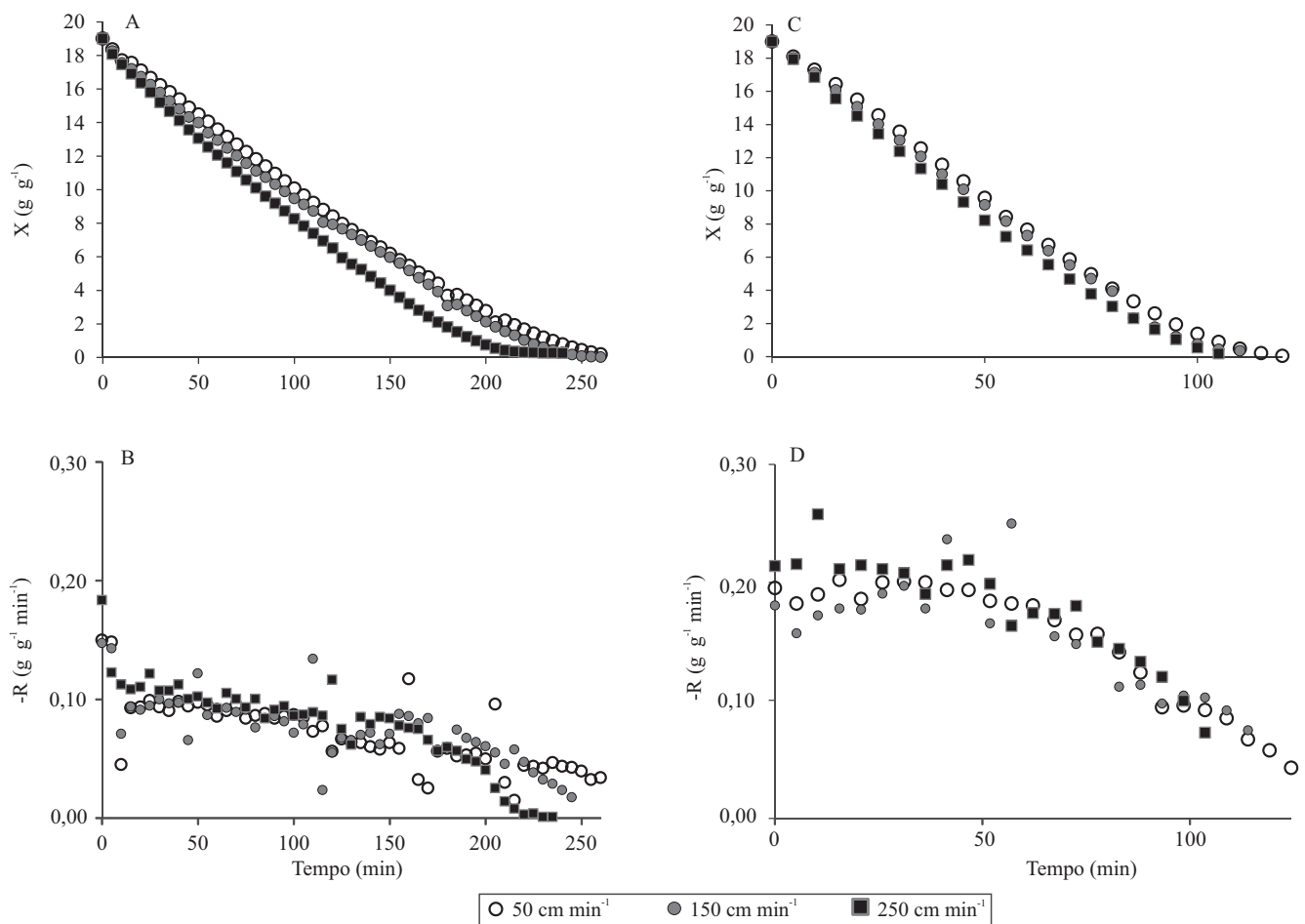


Figura 2. Dados experimentais de perda de água \times tempo para secagem a 40°C (A); taxa de secagem para temperatura de 40°C (B); perda de água \times tempo para secagem a 70°C em estufa (C); e taxas de secagem para temperatura de 70°C (D), a diferentes velocidades de espalhamento (50, 150 e 250 cm min⁻¹) da suspensão amido-glicerol-fibras de celulose.

diferentes temperaturas e espalhados por diferentes velocidades não diferiu significativamente. O módulo de Young, que mede a rigidez dos filmes, obtidos à menor velocidade de espalhamento (50 m s^{-1}) e à menor temperatura de secagem (40°C) diferiram dos preparados à velocidade de espalhamento de 250 m s^{-1} e secos a 70°C . Os filmes secos a 70°C apresentaram permeabilidade levemente menor ($p < 0,05$) do que os secos a 40°C .

Tabela 1. Valores de taxa de secagem (TXS) e tempo de secagem (TS) no período à taxa constante, e tempo total (TT) de secagem das suspensões de amido-glicerol-fibras de celulose, espalhadas a diferentes velocidades do ar, em diferentes temperaturas.

Velocidade (cm min^{-1})	Período de secagem à taxa constante				TT de secagem	
	TXS ($\text{g g}^{-1} \text{min}^{-1}$)		TS (min)		(min)	
	40°C	70°C	40°C	70°C	40°C	70°C
50	0,07	0,17	136,7	65,0	273,3	120,0
150	0,08	0,18	97,5	65,0	261,6	113,3
250	0,08	0,20	131,7	63,3	255,0	110,0

Quando os filmes foram secos em túnel de secagem, à temperatura ambiente, a diferentes velocidades do ar de secagem, a suspensão foi considerada seca quando os filmes apresentaram teor de umidade médio de $0,20 \text{ g g}^{-1}$. O tempo total de secagem variou de forma linear com a velocidade do ar, tendo sido de 6 horas e 20 min, 7 horas e 10 min e 8 horas, para filmes secos a 8, 6 e 4 m s^{-1} , respectivamente (Figura 4 A). Briscoe et al. (1997) verificaram resultado semelhante para suspensões aquosas de cerâmica. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a evaporação a partir da interface aumenta com o aumento da velocidade do gás de secagem (Geankoplis, 1993).

Foram observados três períodos distintos de secagem, independentemente da velocidade do ar utilizada (Figura 4 B). A suspensão filmogênica, com umidade inicial a 95%, foi espalhada a 50°C e seca com ar ambiente. Essa diferença de temperatura levou a um período de adaptação de aproximadamente 50 min, até que a suspensão atingisse uma temperatura próxima da do bulbo úmido do ar ($17,5^\circ\text{C}$), o que resultou em queda na taxa de secagem observada no

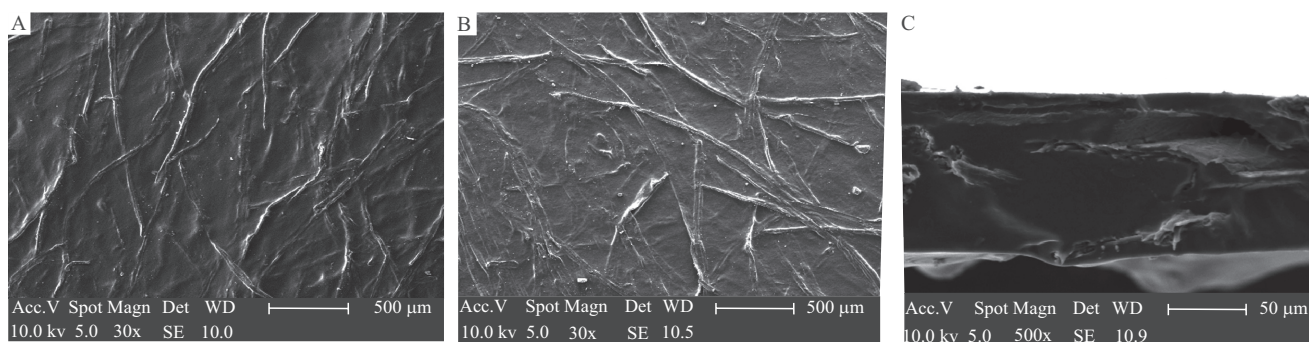


Figura 3. Micrografias dos filmes de amido-glicerol-fibras (amido de mandioca e celulose) JEOL JSM-6390LV. A e B, secagem a 40 e 70°C , respectivamente, aumento de 3X ao microscópio eletrônico de varredura (MEV); e C, fratura do filme seco a 40°C , aumento de 500x ao MEV.

Tabela 2. Resultados de espessura, tensão de ruptura (σ_{rup}), alongamento na ruptura (ϵ) e módulo de Young (E) dos filmes de amido-glicerol-celulose, elaborados a diferentes velocidades de espalhamento, temperaturas de secagem, condicionados à umidade relativa de 58% e permeabilidade ao vapor de água no gradiente 2–75% (PVA)⁽¹⁾.

Velocidade (m min^{-1})	T ($^\circ\text{C}$)	Espessura (μ)	σ_{rup} (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	PVA ($\text{g h}^{-1} \text{m}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) $\times 10^7$
50	40	140±9a	19±2ab	3,3±0,8a	640±230a	3,0±0,3a
50	70	136±5a	23±3b	4,3±1,2a	930±130ab	2,0±0,5b
150	40	115±6b	17±3a	2,4±0,8a	900±90ab	3,1±0,2a
150	70	130±7a	23±2b	3,5±0,7a	970±190ab	2,1±0,2b
250	40	110±6b	24±5ab	3,3±0,7a	1000±170ab	3,4±0,8ac
250	70	132±3a	24±2b	4,5±1,4a	1030±80b	2,5±0,2bc

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

início do processo. Após essa adaptação, um período de secagem à taxa constante foi observado, conforme esperado para secagem de camadas finas de materiais higroscópicos com altos teores de umidade (Denavi et al., 2009; Reis et al., 2013; Tápia-Blácido et al., 2013). A secagem durante o período à taxa constante é determinada pela taxa de transferência de calor entre o ar e o material úmido (Geankoplis, 1993); portanto, a taxa de secagem nesse período depende do fluxo de ar de secagem, e foram de 0,039, 0,044 e 0,053 g g⁻¹ de sólidos secos min⁻¹, para os fluxos de 4, 6 e 8 m s⁻¹, respectivamente. A umidade em que ocorreu a transição da secagem à taxa constante para a secagem à taxa decrescente (umidade crítica do processo, X_c) foi de aproximadamente 2,5 g g⁻¹, independentemente

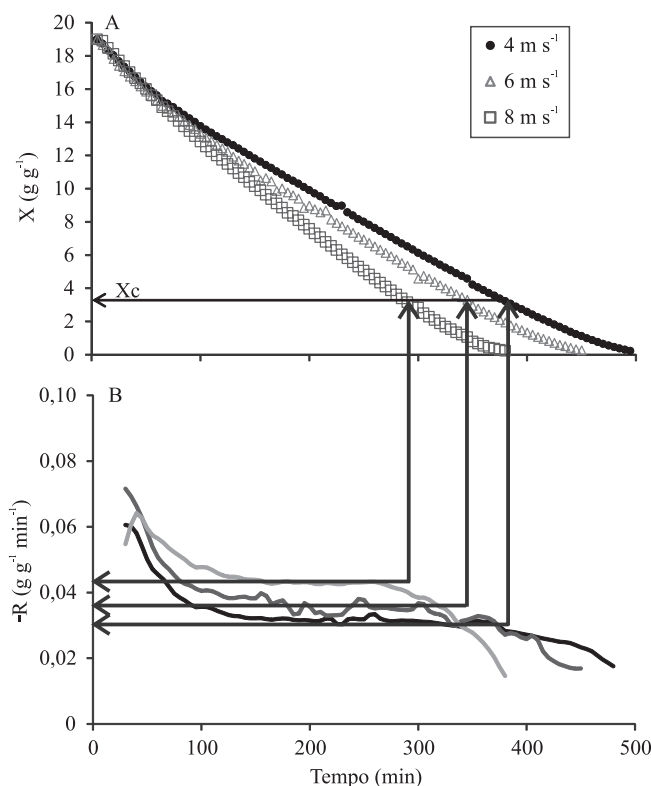


Figura 4. Curvas de secagem das suspensões amido-glicerol-fibras de celulose, submetidas a velocidades do ar de secagem de 4, 6 e 8 m s⁻¹, secas com convecção forçada à temperatura ambiente (A); e taxas de secagem (-R) das suspensões (B). As setas indicam a tendência da taxa de secagem no período, à taxa constante, até encontrar o período à taxa decrescente: umidade crítica (X_c).

da velocidade do ar de secagem. O período de secagem à taxa decrescente foi de aproximadamente 50 min.

Os filmes preparados com a mesma composição e secos a diferentes velocidades do ar de secagem não diferiram quanto à espessura – que ficou em torno de 140 μm –, o que indica ter havido controle efetivo da massa de suspensão filmogênica durante o processo de espalhamento.

Os dados de tensão de ruptura, alongamento na ruptura e módulo de Young não apresentaram diferença significativa, quando diferentes velocidades de ar de secagem foram utilizadas. A tensão de ruptura dos filmes secos com ar a velocidades entre 4 e 8 m s⁻¹ foi de aproximadamente 27 MPa, o alongamento na ruptura foi aproximadamente 4,5% e o módulo de Young foi próximo a 1.000 MPa. Esses resultados indicam que o tempo de secagem pode ser reduzido com o aumento da velocidade do ar, sem que ocorram alterações das propriedades mecânicas dos filmes.

Tápia-Blácido et al. (2013) relataram que a permeabilidade ao vapor d'água de filmes de amido de amaranto-glicerol não foi afetada por diferentes temperaturas e UR do ar de secagem. Comportamento similar foi verificado no presente trabalho, em que a velocidade do ar de secagem também não influenciou significativamente a permeabilidade dos filmes ao vapor d'água, que tiveram valor médio de 3,55 10⁻⁷ g h⁻¹ m⁻¹ Pa⁻¹.

Conclusões

1. As melhores condições para o espalhamento das suspensões de amido-glicerol-fibras por “tape-casting” são as de temperaturas ligeiramente abaixo de 50°C.
2. A velocidade de espalhamento da suspensão de amido-glicerol-fibras com a lâmina niveladora deve ser igual ou superior a 150 cm min⁻¹.
3. O tempo de secagem pode ser reduzido para duas horas, com o ar de secagem na temperatura de 70°C, sem comprometer as propriedades mecânicas dos filmes.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Santa Catarina (Fapesc-SC), pelo suporte financeiro; e à empresa Klabin.

Referências

- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D882-02**: standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- BRISCOE, B.J.; LO BIUNDO, G.; ÖZKAN, N. Drying kinetics of water-based ceramic suspensions for tape-casting. **Ceramics International**, v.24, p.347-357, 1997. DOI: 10.1016/S0272-8842(97)00021-7.
- CANEVAROLO JUNIOR, S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004. 448p.
- CZAPUTA, K.; BRENN, G.; MEILE, W. The drying of liquid films on cylindrical and spherical substrates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.54, p.1871-1885, 2011. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.014.
- DAUD, W.R. bin W.; ARMSTRONG, W.D. Conductive drying characteristics of gelatinized rice starch. **Drying Technology**, v.6, p.655-674, 1988. DOI: 10.1080/07373938808916403.
- DENAVI, G.; TÁPIA-BLÁCIDO, D.R.; AÑÓN, M.C.; SOBRAL, P.J.A.; MAURI, A.N.; MENEGALLI, F.C. Effects of drying conditions on some physical properties of soy protein films. **Journal of Food Engineering**, v.90, p.341-349, 2009. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.001.
- GARDINI, D.; DELUCA, M.; NAGLIATI, M.; GALASSI, C. Flow properties of PLZTN aqueous suspensions for tape-casting. **Ceramics International**, v.36, p.1687-1696, 2010. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.03.011.
- GEANKOPLIS, C.J. **Transport processes and unit operations**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 921p.
- KAVANAGH, G.M.; CLARK, A.H.; ROSS-MURPHY, S.B. Heat-induced gelation of globular proteins: 4. Gelation kinetics of low pH β -lactoglobulin gels. **Langmuir**, v.16, p.9584-9594, 2000. DOI: 10.1021/la0004698.
- KEMP, I.C.; FYHR, B.C.; LAURENT, S.; ROQUES, M.A.; GROENEWOLD, C.E.; TSOTSAS, E.; SERENO, A.A.; BONAZZI, C.B.; BIMBENET, J.J.; KIND, M. Methods for processing experimental drying kinetics data. **Drying Technology**, v.19, p.15-34, 2001. DOI: 10.1081/DRT-100001350.
- MISTLER, R.E.; TWINAME, E.R. **Tape-casting: theory and practice**. Westerville: The American Ceramic Society, 2000. 298p.
- MORAES, J.O. de; SCHEIBE, A.S.; SERENO, A.; LAURINDO, J.B. Scale-up of the production of cassava starch-based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, v.119, p.800-808, 2013. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.07.009.
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; SILVA, C.; PRIETO, D.M.; SOUSA, A.M.M.; HILLIOU, L.; GONÇALVES, M.P. Drying kinetics of biofilms obtained from chestnut starch and carrageenan with and without glycerol. **Drying Technology: an International Journal**, v.29, p.1058-1065, 2011. DOI: 10.1080/07373937.2011.563000.
- MÜLLER, C.M.O.; LAURINDO, J.B.; YAMASHITA, F. Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity. **Carbohydrate Polymers**, v.77, p.293-299, 2009. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.12.030.
- REIS, R.C.; CÔRREA, P.C.; DEVILLA, I.A.; SANTOS, E.S.; ASCHERI, D.P.R.; SERVULO, A.C.O.; SOUZA, A.B.M. e. Drying of yam starch (*Discorea* spp.) and glycerol filmogenic solutions at different temperatures. **LWT - Food Science And Technology**, v.50, p.651-656, 2013. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.07.033.
- SARANTÓPOULOS, C.I.G.L.; OLIVEIRA, L.M. de; PADULA, M.; COLTRO, L.; ALVES, R.M.V.; GARCIA, E.E.C. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. Campinas: CETEA/ITAL, 2002. 267p.
- ROSS-MURPHY, S.B. **Physical techniques for the study of food biopolymers**. London: Chapman & Hall, 1994. 388p. DOI: 10.1007/978-1-4615-2101-3.
- TÁPIA-BLÁCIDO, D.R.; SOBRAL, P.J. do A.; MENEGALLI, F.C. Effect of drying conditions and plasticizer type on some physical and mechanical properties of amaranth flour films. **LWT - Food Science and Technology**, v.50, p.392-400, 2013. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.09.008.

Recebido em 6 de novembro de 2013 e aprovado em 28 de janeiro de 2014