



INFLUÊNCIA DE MATRIZES ENCAPSULANTES NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SUSPENSÕES DE PERMEADO DE SORO LÁCTEO FERMENTADO

Influence of encapsulating matrices on the rheological behavior of fermented whey permeate suspensions

Hugo José Martins CARVALHO¹, Eric Keven SILVA², Soraia Vilela BORGES³, José Guilherme Lembi Ferreira ALVES⁴, Joyce Maria Gomes Da COSTA⁵

RESUMO: Este trabalho objetivou caracterizar o comportamento reológico de suspensões de permeado de soro lácteo, utilizados no processo de microencapsulação por spray dryer. Utilizou-se permeado de soro lácteo fermentado por *Propionibacterium freudenreichii* PS-1, os materiais de parede utilizados foram maltodextrina (DE-20) e amido modificado em uma proporção de 1:4 de ativo e encapsulante, em seis distintos tratamentos. As análises de comportamento reológico e viscosidade aparente foram realizadas com reômetro rotacional de cilindros concêntricos, e os sólidos solúveis por refratometria. Os resultados mostraram que a viscosidade aparente das amostras com maiores quantidades de amido apresentou os maiores valores, inferindo que este material encapsulante afeta mais a viscosidade aparente das suspensões analisadas do que a maltodextrina, resultados semelhantes foram obtidos com o índice de sólidos solúveis. Para o modelo de Newton foi possível notar que todos os tratamentos apresentaram valores superiores a 1 caracterizando-se como suspensões dilatantes e para o modelo de Ostwald-de-Waele todos os tratamentos apresentaram característica pseudoplástica.

Palavras-chave: Permeado de soro lácteo; Reologia; Suspensões.

ABSTRACT: This work aimed to characterize the rheological behavior of whey permeate suspensions, used in the spray dryer microencapsulation process. Whey permeate fermented by *Propionibacterium freudenreichii* PS-1 was used, the wall materials used were maltodextrin (DE-20) and modified starch in a ratio of 1: 4 of active and encapsulant, in six different treatments. The analysis of rheological behavior and apparent viscosity were performed with a rotational rheometer of concentric cylinders, and solids soluble by refractometry. The results showed that the apparent viscosity of the samples with the highest amounts of starch presented the highest values, inferring that this encapsulating material affects the apparent viscosity of the analyzed suspensions more than the maltodextrin, similar results were obtained with the soluble solids index. For the Newton model it was possible to notice that all treatments showed values greater than 1, characterized as dilating suspensions and for the Ostwald-de-Waele model, all treatments presented pseudoplastic characteristics.

Key words: Whey permeate; Rheology; Suspensions.

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 20/04/2021; aprovado em 05/06/2021

¹*Graduando em Engenharia de Alimentos, Instituto de Ciência e Tecnologia/Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina; (038) 999693659, martinschugo@gmail.com.

²phD, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, engerickeven@gmail.com

³Doutora, Departamento de Ciência de Alimentos/Universidade Federal de Lavras, sborges@ufla.br

⁴JDoutor, Departamento de Ciência de Alimentos/Universidade Federal de Lavras, jlembi@ufla.br

⁵phD, Professora Adjunta, Instituto de Ciência e Tecnologia/Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, joyce.costa@ict.ufvjm.edu.br

INTRODUÇÃO

O soro de leite é um subproduto oriundo da produção de queijo, que ao ser filtrado para recuperação das proteínas do soro, origina como resíduo final o permeado de soro (Dallas *et al.*, 2014). Segundo Treu *et al.* (2019) o permeado de soro de leite é considerado um recurso nutricionalmente valioso para crescimento microbiano, porque contém nutrientes como oligoelementos, lactose, proteínas e lactato. É considerado uma matéria-prima adequada em processos fermentativos para a produção de ácidos orgânicos (lático, acético e propiônico), onde a lactose pode ser convertida em ácidos carboxílicos, responsáveis pelo aroma de queijo suíço produzido via processo fermentativo conduzido por *Propionibacterium freudenreichii* PS-1, sendo uma interessante aplicação em produtos diversos, agregando maior valor ao permeado ultrafiltrado (PARASHAR, 2014). Os ácidos produzidos apresentam alta instabilidade a fatores externos (luz, umidade, temperatura, oxigênio), devendo ser protegidos pela técnica de microencapsulação, a fim de potencializar a vida de prateleira destes compostos e garantir sua qualidade (SAGIS, 2015).

A reologia é uma ciência que estuda a deformação e escoamento de materiais, devido à força neles aplicadas, ela está relacionada com a deformação de sólidos e deformação e escoamento de fluidos líquidos e gasosos (RAO & STEFFE, 1992, BASTOS, 2018). Através dela é possível obter informações sobre a forma como determinado material reage, quando sujeito a uma força de carácter mecânico. O resultado do seu comportamento será influenciado pelas diferentes interações entre os vários componentes do processamento a que foi sujeito e da sua composição química (BASTOS, 2018).

As características reológicas desempenham um papel significativo no projeto de processos como fluxo de fluido, dimensionamento de bomba, extração, filtração, extrusão e purificação, pasteurização, evaporação e processos de secagem. As propriedades reológicas de alimentos têm um papel importante durante os processos de desenvolvimento, produção e processamento. Os processos industriais envolvem uso de diversas operações unitárias que se relacionam diretamente com as propriedades reológicas (SOUZA, 2007; GONÇALVES, *et al.*, 2013; BASTOS, 2018)

A ciência da reologia possui muitas aplicações nos campos da aceitabilidade, processamento, controle de qualidade e manipulação de alimentos. (ALVARADO & AGUILERA, 2001). Os alimentos, todavia, são materiais reologicamente complexos e em muitos casos, que consistem em uma mistura de sólidos, bem como fluidos de componentes estruturais (SOUZA, 2007; MELO, *et al.*, 2020).

A descrição do comportamento reológico de alimentos foi realizado através de modelos empíricos e semiempíricos, os quais são usados para relacionar a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação. Na literatura, foi possível encontrar diversas equações, aos quais, que descrevem o comportamento não newtoniano de fluidos e, entre as mais utilizadas, encontraram-se os modelos de Ostwald-de-Waele, Herschell-Buckley e Mizrahi & Berk. O modelo de Ostwald-de-Waele, é o mais utilizado na descrição do comportamento reológico de fluidos, devido sua fácil aplicação (BRANCO, 1995, SOUSA *et al.*, 2017). Os dados fornecidos são de grande utilidade na

área de alimentos principalmente para o desenvolvimento de produtos e correlacionar parâmetros físicos e sensoriais (OLIVEIRA *et al.*, 2008; ALMEIDA, *et al.*, 2020).

Segundo Feitosa *et al.* (2018) no que corresponde as propriedades reológicas de suspensões elaboradas a partir de permeado de soro, são de fundamental importância para a modelagem de processos de secagem por atomização, uma vez que estas propriedades podem determinar o comportamento do fluxo, que deve ser conhecido para o projeto do sistema de alimentação, bem como, para a compreensão da distribuição de material dentro do secador.

O objetivo do presente trabalho foi o estudo da influência dos encapsulantes maltodextrina e amido modificado no comportamento reológico, viscosidade e sólidos solúveis de suspensões de permeado de soro lácteo fermentado, utilizadas na microencapsulação de bioaroma de queijo suíço por atomização, através do ajuste dos modelos reológicos de Newton, Ostwald-de-Waele.

MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram realizadas no Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Inicialmente o permeado de soro lácteo fermentado foi centrifugado a 5000 rpm durante 20 minutos para separação das células. O sobrenadante contendo ácidos orgânicos foi coletado e utilizado para o preparo das suspensões. Foram elaboradas seis suspensões, cada uma contendo 100 mL do permeado fermentado e 100 mL de água destilada, na qual os encapsulantes foram hidratados por 12 horas. Os encapsulantes utilizados foram Maltodextrina (20 DE – Dextroses Equivalentes) e Amido Modificado (Capsul). O total de encapsulante utilizado foi 20 g, sendo utilizada a relação de 1:4 (ativo: encapsulante). A Tabela 1 apresenta o percentual dos respectivos encapsulantes utilizados em cada um dos seis tratamentos.

Tabela 1 – Porcentagem de encapsulantes utilizados nos tratamentos.

Tratamentos	Amido Modificado (%)	Maltodextrina (%)
1	0	0
2	85,5	14,5
3	14,5	85,5
4	50	50
5	0	100
6	100	0

O comportamento reológico e viscosidade aparente das amostras foi determinado utilizando-se um reômetro rotacional de cilindros concêntricos Brookfield DVIII Ultra (Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, USA), usando-se adaptador para pequenas amostras 13R/RP (19,05 mm de

diâmetro e profundidade de 64,77 mm, Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, USA) e sensor de cisalhamento coaxial SC4-18/13R (17,48 mm de diâmetro e 35,53 mm de comprimento; Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, USA). As amostras foram analisadas na temperatura de 19,7±0,1°C e submetidas a uma rampa crescente de taxa de deformação que variou linearmente de 171,6 a 316,8 s⁻¹ nos primeiros 4,05 minutos (curva ascendente) e retornou para 171,6 s⁻¹ nos 4,05 minutos seguintes (curva descendente), com objetivo de verificar se havia existência de tixotropismo, sendo tomados 20 pontos. A velocidade rotacional foi alterada de 130 a 240 rpm, aumentando 0,45 rpm a cada segundo. O volume de amostra utilizado em cada um dos tratamentos foi de 6,7 mL. Os dados foram coletados através do software Rheocalc® 32 (versão 3.1-1). Para o comportamento reológico os dados obtidos foram ajustados aos modelos reológicos de Newton e Ostwald-de-Waele, apresentados na Tabela 2, fazendo-se uso de regressão não-linear, pelo método Quasi-Newton e critério de convergência de 10⁻⁴, utilizando-se o software STATISTICA versão 8.0 (STATSOFT, 2003). Para a determinação do melhor ajuste foi utilizado como critério o Coeficiente de Determinação (R²) e o Erro Relativo (ε), calculados pelas equações 1 e 2, respectivamente:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_{(teor)} - \overline{\tau_{(exp)}})^2}{\sum_{i=1}^n (\tau_{(exp)} - \overline{\tau_{(exp)}})^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\tau_{(exp)} - \tau_{(teor)}}{\tau_{(exp)}} \quad (2)$$

em que:

$\tau_{(exp)}$ = tensão de cisalhamento experimental (Pa);

$\tau_{(teor)}$ = tensão de cisalhamento estimada pelo modelo (% base seca);

$\overline{\tau_{(exp)}}$ = valor médio da tensão de cisalhamento experimental (Pa).

Tabela 2. Modelos reológicos utilizados no estudo do comportamento da suspensão.

Modelo Reológico	Equação
Newton	$\tau = \eta \left(\frac{du}{dy} \right)$
Ostwald-de-Waele	$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$

Fonte: Adaptado de Melo, 2008.

em que: τ – tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 – tendão de cisalhamento inicial (Pa);

η – viscosidade newtoniana;

$\left(\frac{du}{dy} \right)$ – taxa de deformação (s⁻¹);

k – índice de consistência (Pa.sⁿ);

n – índice de comportamento do fluido (adimensional).

A determinação de sólidos solúveis foi realizada por refratometria segundo o método 932.12 da AOAC (1990) com o uso do refratômetro portátil da marca INSTRUTHERM, modelo RT-82. Os resultados foram expressos em °Brix.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a viscosidade aparente a uma velocidade de 10 RPM e o teor de sólidos solúveis das suspensões. Observou-se que todas as suspensões diferiram entre si em relação ao teor de sólidos solúveis, sendo que os tratamentos nos quais havia maior porcentagem de amido modificado sobressaíram como as suspensões de maiores sólidos solúveis em relação aos demais tratamentos utilizados. Resultado semelhante foi obtido para a viscosidade aparente. A suspensão do Tratamento 6 apresentou maior viscosidade aparente, seguida das suspensões dos Tratamentos 3 e 4, nas quais, respectivamente, a porcentagem de amido modificado utilizado foi de 100, 15,5% e 50%, ou seja, verificou-se que o amido modificado, em relação a maltodextrina, é o material encapsulante que mais afeta a viscosidade aparente das suspensões analisadas. Observou-se também que não houve diferença significativa, na viscosidade aparente, em relação aos Tratamentos 1 e 5, ou seja, a maltodextrina, na proporção utilizada, não apresenta influência sobre a viscosidade aparente da suspensão de permeado de soro lácteo fermentado.

Tabela 3. Médias dos sólidos solúveis e viscosidade aparente das suspensões.

Tratamentos	Viscosidade Aparente (mPa.s)	Sólidos Solúveis (°Brix)
1	3,32 ^d	4,93 ^f
2	3,99 ^c	12,00 ^c
3	5,14 ^b	13,50 ^b
4	4,23 ^c	11,00 ^d
5	3,13 ^d	9,00 ^e
6	7,96 ^a	14,50 ^a

As médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si no teste de Tukey (p < 0,05).

Segundo YANG *et al.* (2009) a viscosidade aparente tem efeitos significativos sobre o encapsulamento. Suspensões com limites máximos e mínimos de viscosidade aparente não apresentam rendimentos significativamente diferentes, ou seja, os melhores rendimentos são obtidos em faixas intermediárias de viscosidade aparente. Uma alta viscosidade impede a atomização adequada na alimentação da câmara de secagem ou leva a secagem insuficiente do material encapsulante por causa de partículas muito grandes que são formadas (ROSENBERG *et al.*, 1990).

Segundo Oliveira & Petrovick (2010) a viscosidade da formulação interfere na formação de gotas esféricas. Deste modo, menos energia e pressão são aplicadas quando a viscosidade for baixa, logo a partir dos resultados obtidos nota-se que suspensões com material encapsulante maltodextrina são mais recomendadas em proporções de 100% e 85,5% onde a viscosidade das suspensões foram menores. Para suspensões mais viscosas, como foi o caso dos tratamentos com amido, há

possível impedimento da formação adequada das gotículas durante a aspersão no spray dryer, propiciando aumento no tamanho de partícula, devido à formação de gotículas maiores durante a etapa de aspersão (OLIVEIRA, PETROVICK, 2010).

A influência do teor de sólidos no material de partida é refletida no tamanho de partícula e na densidade do produto final. De acordo com Cao *et al.* (2000) e Oliveira & Petrovick (2010), o aumento no conteúdo de sólidos, eleva a viscosidade, resultando em pós com maior densidade. Além disso, quanto menor o conteúdo de sólidos em uma suspensão, maior o espaço oco interno da partícula (ballooning), porém as paredes tornam-se menos espessas. Outro fator importante a ser considerado, é a viscosidade da formulação, pois esta interfere na formação de gotas esféricas. Deste modo, menos energia ou menor pressão são aplicadas quando a viscosidade for baixa. Por outro lado, a viscosidade elevada da formulação impede a formação adequada das gotas durante a aspersão (Oliveira; Petrovick, 2010), propiciando aumento no tamanho de partícula, devido à formação de gotículas maiores.

Os resultados obtidos referentes ao comportamento reológico dos tratamentos realizados, para cada um dos modelos utilizados são apresentados na Tabela 4.

O parâmetro n define o comportamento do fluido newtoniano ou não-newtoniano. Os fluidos newtonianos

apresentam valor de n igual a 1, porém, quando apresentam comportamento não-newtoniano o valor n é diferente de 1. Quando o valor apresentado é menor que 1, o fluido é considerado pseudoplástico, ou seja, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação. Se a viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação, o valor de n é maior que 1 e o fluido é considerado dilatante (BIRD *et al.*, 1960).

Logo analisando os resultados obtidos é notável que para o modelo Newton todos os tratamentos apresentaram valores superiores a 1 caracterizando-se como suspensões dilatantes. O ensaio 6 foi o que apresentou os maiores valores ($n > 1$), seguidos dos tratamentos 2, 4 e 4, respectivamente, onde correspondem com o declínio da proporção de amido modificado nas suspensões, a alta viscosidade das suspensões em tratamentos com amido modificado é justificado pelo poder espessante associado ao mesmo, onde proporciona um aumento da viscosidade em suspensões/emulsões alimentares.

No modelo de Ostwald-de-Waele exibiram um comportamento pseudoplástico, devido os valores do índice de comportamento do fluido (n) serem menores que 1 ($n < 1$) para todas os tratamentos. É possível notar que, para suspensões com caráter pseudoplástico, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento que depende principalmente da orientação/alinhamento das moléculas ou partículas na direção do fluxo.

Tabela 4. Resultados obtidos para os ajustes dos modelos reológicos de Newton e Ostwald-de-Waele.

Newton						
Tratamento	1	2	3	4	5	6
η	1,88	3,27	2,26	2,71	1,88	6,08
R^2	0,962	0,989	0,982	0,991	0,985	0,996
Ostwald-de-Waele						
Tratamento	1	2	3	4	5	6
k	6,28	6,78	5,58	5,37	4,27	9,25
n	0,78	0,87	0,84	0,88	0,85	0,92
R^2	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999

CONCLUSÕES

Conclui-se que os modelos do comportamento reológico apresentaram excelentes ajustes aos dados experimentais dos tratamentos realizados. Os valores do índice de fluxo (η) foram inferiores a 1 ($0 < \eta < 1$), para o modelo Ostwald-de-Waele o fluido foi considerado pseudoplástico e para o modelo de Newton apresentou característica dilatante, e esta suspensão foi considerada como um fluido não-newtoniano.

Para tratamentos que utilizaram maiores proporções de amido modificado os valores da viscosidade aparente foram superiores aos com maltodextrina, assim como no índice de sólidos solúveis.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; PEREIRA, T. S.; SILVA, V. M. A.; RIBEIRO, V. H. A.; SILVA, L. N.; MUNIZ, C. E. S.; SILVA, L. R. I.; MOREIRA, F. I. N.; MONTEIRO, Y. G. Estudo reológico da polpa de Jabuticaba com diferentes

concentrações de goma arábica. Research, Society and Development, v. 9, p. 1-13, 2020.

ALVARADO, J.D.; AGUILERA, J.M. Métodos para medir Propriedades Físicas em Indústrias de Alimentos. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, 2001. p.410.

BASTOS GAVINA, J. I. Desenvolvimento e caracterização reológica de potenciais materiais de referência não newtonianos. 2018. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) - Universidade de Lisboa, 2018.

BIRD, R. B. Transport phenomena. New York: John Wiley, 1960.

BRANCO, I. G. Suco de laranja concentrado: comportamento reológico a baixas temperaturas. 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de Campinas, Campinas, 1995.

- CAPITANI, M. I.; CORZO-RIOS, L. J.; CHEL-GUERRERO, L. A.; BETANCUR-ANCONA, D. A.; NOLASCO, S. M.; TOMÁS, M. C. Propriedades reológicas de dispersões aquosas de mucilagem de chia (*Salvia hispanica L.*). *Journal of Food Engineering*, v. 149, p. 70-77, 2015.
- CAO, X.Q.; VASSEN, R.; SCHWARTZ, S.; JUNGEN, W.; TIETZ, F.; STÖEVER, D. Spray-drying of ceramics for plasma-spray coating. *J Eur Ceram Soc* 20:p. 2433-2439, 2000.
- DALLAS, D. C.; WEINBORN, V. BELL, J. M. L. N. M.; WANG, M.; PARKER, E.A.; GUERRERO, A.; HETTINGA, K.A.; LEBRILLA, C.B.; GERMAN, J.B.; BARILE, D. A avaliação peptidômica e glicômica abrangente revela que o permeado de soro de leite doce do colostro é uma fonte de peptídeos e oligossacarídeos derivados da proteína do leite. *Food Res. Int.*, v.63, p. 203 – 209, 2014.
- FEITOSA, R. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; OLIVEIRA, E. N. A. Comportamento reológico da polpa de murta com maltodextrina. *Revista Engenharia na Agricultura*, v.26, n.05, p.391-398, 2018.
- GONÇALVES, M. V. V. A., DA SILVA, J. P. L., MATHIAS, S. P., ROSENTHAL, A., & DE ARAUJO CALADO, V. M. Caracterização físico-química e reológicas da polpa de Cupuaçu congelada (*Theobroma grandiflorum schum.*). *Exatas & Engenharia*, v. 3 (07), p. 46-53, 2013.
- MELO, K. C. Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- MELO, F. S.; OKANEKU, B. M.; CARDOSO, D. N. P.; SANTOS, W. G. Avaliação reológica da polpa e concentrado de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum schum.*). *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.6, n.7,p. 45182-45192, 2020.
- OLIVEIRA, K. H.; SOUZA, J. A. R.; MONTEIRO, A. R. Caracterização reológica de sorvetes. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.28, n°3, Campinas, 2008.
- OLIVEIRA, O. W.; PETROVICK, P. R. Secagem por aspersão (spray drying) de extratos vegetais: bases e aplicações. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v.20 n°4, p. 641-650, 2010.
- PARASHAR, A.; JIN, Y.; MASON, B.; CHAE, M.; BRESSLER, D. C. Incorporação de permeado de soro de leite, um efluente de laticínios, na fermentação do etanol para fornecer uma solução de desperdício zero para a indústria de laticínios. *Journal of Dairy Science*, v. 99, ed. 3, pg. 1859-1867, 2016.
- RAO, M. A.; STEFFE, J. F. *Viscoelastic properties of solid foods*. London; New York: Elsevier Applied Science, 1992.
- SAGIS, L.M.C. *Microencapsulação e microesferas para aplicações em alimentos*, Academic Press, 2015.
- SOUSA, A. **Secagem por aspersão de ácidos graxos de cadeia curta obtidos por fermentação de permeado de soro por células livres de *Propionibacterium freudenreichii PS-1***. 2007. 140p. Tese (Doutor em Ciência dos Alimentos) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- STATSOFT. *Statistica for Windows computer program manual*. Tulsa: StatSoft, 2003.
- TREU, L.; TSAPEKOS, P.; PEPRAH, M.; CAMPANARO, S.; GIACOMINI, A.; CORICH, V.; KOUGIAS, P.G.; ANGELIDAKI, I. Perfil microbiano durante a digestão anaeróbia de soro de queijo em reatores operados em diferentes condições. *Bioresour. Technol.*, v. 275, p. 375 – 385, 2019.