

# MONITORAMENTO DO PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DE PROTEÍNAS VEGETAIS EM LEITO FLUIDIZADO

Larissa Christina Ceragioli de Almeida<sup>1</sup>; Luciane Franquelin Gomes de Souza<sup>2</sup>; Tatiana Guinoza Matuda Masaoka<sup>2</sup>; Marcello Nitz<sup>2</sup>; Kaciane Andreola<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *A aglomeração em leito fluidizado é utilizada para melhorar as propriedades físicas de pós. O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de aglomeração de proteínas vegetais em leito fluidizado monitorando em tempo real variáveis críticas do processo, a fim de explicar e melhor compreender a influência dessas variáveis no desempenho do processo e na qualidade do pó aglomerado. O monitoramento em tempo real da umidade relativa do ar na saída do leito possibilitou um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo. Alta vazão de ligante aliada à baixa temperatura do ar resultou na predominância do período de umedecimento das partículas, proporcionando maior rendimento, porém um pó com umidade superior ao aceitável. As condições do ensaio 4 ( $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $Q=3,5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) e do ponto central ( $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $Q=3,0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) foram consideradas as melhores em relação ao rendimento do processo e às propriedades físicas dos pós, respectivamente, dentre os ensaios que resultaram em pós com umidade aceitável. Os pós aglomerados apresentaram melhor fluidez, menor tempo de molhamento e maior tamanho de partículas em relação à matéria-prima, indicando que a polpa de açaí atuou de forma satisfatória como ligante.*

## Introdução

Nos últimos anos, o Brasil sofreu grandes transformações socioeconômicas e culturais, impulsionando o consumo de produtos alimentícios de fácil preparo. Essas mudanças nos hábitos alimentares estão relacionadas com os elevados índices de sobrepeso e obesidade e com a crescente ocorrência de doenças crônicas não transmissíveis (DCNT), tais como câncer, diabetes, osteoporose, doenças cardiovasculares e respiratórias (Brasil, 2014; WHO, 2018).

A adoção de uma dieta a base de vegetais tem sido associada a diversos benefícios para a saúde humana. Entretanto, há uma preocupação em relação à ingestão proteica (Pedro, 2010), sendo que, para garantir que se tenha a ingestão correta de aminoácidos essenciais, consumidores tem focado no consumo de proteínas em diversas formas, como barras de proteínas e pós de suplementação. As proteínas vegetais vêm se destacando na formulação de novos produtos por apresentarem propriedades nutracêuticas, nutritivas e funcionais, com destaque para proteínas do arroz e da ervilha (Saunders, 1990; Do Carmo *et al.*, 2016), que são hipoalergênicas (Helm e Burks, 1996; Krefiting *et al.*, 2017). O aumento no consumo das proteínas de ervilha e arroz está atrelado aos seus benefícios à saúde, uma vez que seu consumo está relacionado com a redução do risco de doenças como câncer, Alzheimer, colesterol alto, hipertensão e diabetes (Shoji *et al.*, 2001; Han *et al.*, 2015; Krefiting *et al.*, 2017).

As proteínas de ervilha e de arroz possuem em sua composição os nove aminoácidos essenciais que o organismo humano não é capaz de sintetizar, mas que são necessários para o seu funcionamento. A proteína de ervilha possui alta quantidade de lisina, mas baixa quantidade de metionina (Boye *et al.*, 2010). Já a proteína de arroz contém grande quantidade de metionina e pouca quantidade de lisina (Juliano, 1993). Com isso, a mistura dessas proteínas em proporções corretas assegura a quantidade recomendada pela FAO (2011) de todos os aminoácidos essenciais recomendados na dieta (Pietrysiaka *et al.*, 2018).

A maioria dos pós proteicos comerciais de arroz e de ervilha apresentam partículas finas e coesivas com baixa molhabilidade e dispersão em líquidos, baixa fluidez, dificuldade de manipulação

e formação de poeira, o que dificulta o seu uso em aplicações industriais e domésticas (Andreola, 2017). O processo de aglomeração é uma alternativa para melhorar a qualidade desses pós, visto que esse processo proporciona o aumento do tamanho das partículas e mudanças em suas propriedades físicas (Knight, 2001).

Por proporcionarem altas taxas de transferência de massa e calor, leitos fluidizados são amplamente utilizados em processo de aglomeração (Kunii e Levenspiel, 1991), além de possibilitarem a ocorrência simultânea de umedecimento e secagem no mesmo equipamento (Lister e Ennis, 2004). Na aglomeração em leito fluidizado, um líquido ligante é atomizado sobre partículas sólidas movimentadas por ar quente. As partículas umedecidas colidem umas com as outras formando pontes líquidas que são secas pelo ar quente originado as pontes sólidas, promovendo assim o aumento do tamanho das partículas (Turchiuli *et al.*, 2005).

O monitoramento em tempo real de variáveis críticas do processo de aglomeração, tais como umidade relativa e temperatura do ar na entrada e saída do leito, umidade do material e tamanho das partículas é interessante, pois fornece informações relevantes sobre os fenômenos que ocorrem durante o processo (Andreola, 2017). Além disso, o monitoramento dessas variáveis possibilita a obtenção da estabilidade do regime de fluidização, assegurando alta reprodutibilidade na qualidade do produto, melhorias em aspectos de segurança do processo, redução do número de falhas nas bateladas e economia de energia e mão-de-obra, além de impedir a defluidização do leito, que pode levar ao seu colapso total (Da Silva, 2014). O desafio do processo de aglomeração em leito fluidizado consiste em aplicar o ligante de maneira uniforme e secar o sólido a uma taxa adequada, de modo a encontrar um equilíbrio entre umedecimento e secagem, de modo a evitar tanto a elutriação das partículas quanto a defluidização do leito.

Na aglomeração de pós proteicos é desejável o uso de um ligante que não altere a composição estritamente proteica desses pós e que contribua para o seu valor nutricional. A polpa de açaí possui um alto valor nutricional e energético, além de ser rica em compostos bioativos, como ênfase para as antocianinas, que são antioxidantes naturais benéficos à saúde (Rogez *et al.*, 2000). Desse modo, o uso dessa polpa como ligante na aglomeração de pós proteicos pode agregar valor nutricional e funcional aos pós aglomerados.

O objetivo deste trabalho foi estudar o processo de aglomeração de proteínas vegetais em leito fluidizado monitorando em tempo real variáveis críticas do processo, a fim de explicar e melhor compreender a influência dessas variáveis no desempenho do processo e na qualidade do pó aglomerado. Este trabalho é uma parte do Projeto de Pesquisa Fapesp 2018/10483-2.

## **Material e Métodos**

### Matéria-prima

Um *blend* de proteínas vegetais em pó foi utilizado como matéria-prima da aglomeração. O *blend* foi preparado misturando a proteína isolada de ervilha (Pea Unique 86, Pevesa Biotech, Espanha) com a proteína concentrada de arroz (Rice Standard 80, Wuxi Jinnong Biotechnology Co., Ltd, China) na proporção de 2:1, pois essa proporção fornece a quantidade adequada de todos os aminoácidos essenciais atendendo as recomendações da FAO (2011). Detalhes da quantidade dos aminoácidos dessas proteínas são reportados por Porto *et al.* (2019). Polpa de açaí (Açaí Rio Negro) produzida e envasada pela empresa Xingu Fruit Polpas de Frutas Indústria e Comércio LTDA (Castanhal, PA) e distribuída pela empresa Demarchi (Jundiá, SP) foi utilizada como ligante em temperatura ambiente ( $\pm 25$  °C). A polpa de açaí contém sólidos, o que ocasionava o entupimento do bico atomizador e a parada do processo. De modo a evitar essa ocorrência, a polpa de açaí foi passada em uma peneira de *mesh* 60 (abertura de 0,246 mm).

### Sistema experimental

A aglomeração foi realizada em um leito fluidizado (Zelus, LF-50). As partículas elutriadas são coletadas por um ciclone. Um compressor radial (IBRAM, modelo CR6) conectado a um inversor de frequência (WEG, modelo CFW300) fornece o ar de fluidização, que é aquecido por resistência

elétrica controlada por regulador PID (Novus, N1100). Uma bomba peristáltica (Masterflex L/S 07551-20) transporta o ligante até um bico aspersor do tipo duplo fluido. Duas termoresistências do tipo Pt-100 (Novus, Miami, EUA) foram utilizadas para monitorar a temperatura no interior do leito. Dois termohigrômetros RHT-XS (Novus, Miami, EUA) foram utilizados para monitorar a umidade relativa do ar na entrada e saída do leito. Os sensores são conectados a um sistema de aquisição de dados composto por uma placa NI cDAQ-9172 (*National Instruments<sup>TM</sup>*), a qual registra e coleta os dados a cada segundo. A interface entre o processo e placa de aquisição de dados é feita por meio do *software* LabVIEW 2017 (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, National Instruments<sup>TM</sup>*) e de um instrumento virtual, utilizando um computador (Intel® Core™ i5). Detalhes do sistema experimental são descritos em Custodio *et al.* (2020) e em Ferreira *et al.* (2019).

### Ensaio de aglomeração

Os ensaios de aglomeração foram realizados conforme proposto por Porto *et al.* (2019). No entanto, no presente estudo, foi realizado o monitoramento em tempo real das variáveis do processo. Os ensaios foram executados de acordo com um planejamento composto central rotacional (PCCR), com triplicata no ponto central, totalizando 11 experimentos. As variáveis de entrada estudadas foram a temperatura do ar de fluidização ( $T$ ,  $X_1$ ) e vazão de atomização do ligante ( $Q$ ,  $X_2$ ). As variáveis massa de material (0,405 kg), pressão de atomização (10 psi), quantidade de ligante (200 mL) e altura do bico aspersor em relação à base do leito (0,22 m) foram mantidas em valores fixos. A vazão do ar de fluidização iniciou em  $10 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  e foi aumentada, a cada 10 minutos, em incremento de  $9 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  até atingir, aproximadamente,  $38 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Como respostas do planejamento foram analisadas a umidade do pó aglomerado ( $U$ ), a mediana do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ) e o rendimento do processo ( $\eta$ ). As variáveis de entrada, com seus respectivos valores reais e codificados, são apresentadas na Tabela 1. O estudo do efeito das variáveis sobre as respostas foi realizado com auxílio do *software* Statistica® 10.0, considerando nível de confiança de 95 %.

Tabela 1 – Variáveis operacionais e níveis do PCCR.

Variáveis Reais	Níveis				
	-1,41	-1	0	1	1,41
T (°C)	60,9	65	75	85	89,1
Q (mL·min <sup>-1</sup> )	2,295	2,5	3,0	3,5	3,705

Para cada variável de resposta foi proposto um modelo matemático. Buscou-se o modelo mais adequado, ou seja, aquele em que o valor do  $R^2$  ajustado atingiu seu valor máximo com a eliminação dos fatores não significativos. A significância estatística dos modelos e a qualidade do ajuste foram determinadas pela análise de variância (ANOVA), realizando-se o teste F de Fischer. De acordo com esse teste, para um modelo ser considerado significativo, o valor de  $F_{R,r}$  calculado para verificar a significância da regressão deve ser maior do que o valor de F tabelado. Para o modelo ser considerado preditivo, o valor de  $F_{faj,ep}$  calculado para verificar a falta de ajuste deve apresentar um valor menor que o valor de F tabelado. Também, foram avaliados os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) de cada modelo, sendo que valores próximos a unidade são considerados satisfatórios.

### Rendimento

O rendimento do processo ( $\eta$ ) foi obtido por meio da Equação 1, sendo definido como a razão entre a massa de pó remanescente no leito ao final dos experimentos ( $m_f$ ) e a massa inicial adicionada no leito ( $m_i$ ), ambas em base seca.

$$\eta(\%) = \frac{m_f}{m_i} = \frac{m_i - (m_{elut} + m_{inc} + m_{tor})}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

A massa de sólidos adicionada ao leito ( $m_i$ ) é composta pela massa do *blend* de proteínas e a massa de sólidos do ligante (polpa de açaí). A massa de sólidos remanescente no leito ao final dos experimentos ( $m_f$ ) refere-se à massa inicial adicionada ao leito excluindo-se a massa de material elutriado ( $m_{elut}$ ), a massa de material incrustada nas paredes do leito ( $m_{inc}$ ) e a massa de torrões obtidos

ao final do processo ( $m_{tor}$ ). Ao final de cada experimento, o pó obtido foi passado por uma peneira de *mesh* 18 (abertura de 1 mm). As partículas maiores que esse tamanho foram denominadas como torrões, o que foi definido com base em Andreola (2017).

### Caracterização dos pós

A caracterização dos pós foi realizada por meio de análises de umidade, tamanho das partículas, fluidez, tempo de molhamento e cor. Todas as análises foram realizadas em triplicata. Detalhes das metodologias utilizadas são descritos em Porto *et al.* (2019).

A umidade (U % b.u.) foi determinada com o auxílio de um analisador de umidade com aquecimento por lâmpada de halogênio (Shimadzu Corporation, MOC63u). Foi estipulado como aceitável um teor de umidade final do pó aglomerado igual ou inferior a 10 % (b.u.). Esse valor foi escolhido com base no limite máximo de umidade dos pós proteicos utilizados neste trabalho, de acordo com o laudo técnico do fabricante, a fim de assegurar o armazenamento seguro do produto. A mediana do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ) foi obtida por difração a laser (Bettersizer S3 Plus, Bettersizer Instruments, China) via úmida, utilizando álcool isopropílico como meio líquido. O nível de fluidez foi obtido pelo índice de Hausner (HR) e pelo índice de compressibilidade de Carr (IC) (Turchiuli *et al.*, 2005). As partículas foram classificadas, em relação ao escoamento, em diversas categorias de fluidez ou escoabilidade segundo a Farmacopeia Americana (USP 37, 2014). O tempo necessário para completar o umedecimento e imersão de um pó em uma superfície líquida é chamado de tempo de molhamento. O teste de tempo de molhamento foi realizado conforme descrito em Custodio *et al.* (2020) com o auxílio de um dispositivo ilustrado por Ferreira *et al.* (2019). O tempo de molhamento é determinado pelo momento em que todo o sólido fica molhado e desaparece da superfície do líquido. Para uma medição mais precisa, o teste é gravado e editado com auxílio do *software* Movavi Clips.

### **Resultados e Discussão**

A matéria-prima (*blend* de proteínas) apresentou umidade de  $6,17 \pm 0,08$  % (b.u.) e mediana do tamanho das partículas  $D_{50}$  de  $71,949 \mu\text{m} \pm 0,244 \mu\text{m}$ . A umidade da polpa de açaí foi de  $89,93 \pm 0,19$  % (b.u.). Os resultados de umidade do pó aglomerado (U), mediana do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ) e rendimento do processo constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de planejamento do PCCR e resultados das respostas.

Ensaio	T (°C)	Q (mL·min <sup>-1</sup> )	U (%)	$D_{50}$ (μm)	η (%)
1	65 (-1)	2,5 (-1)	$7,61 \pm 0,05$	143,1	44,05
2	65 (-1)	3,5 (+1)	$17,02 \pm 0,06$	164,3	56,79
3	85 (+1)	2,5 (-1)	$5,93 \pm 0,11$	181,0	26,52
4	85 (+1)	3,5 (+1)	$9,32 \pm 0,10$	168,3	54,47
5	60,9 (-1,41)	3,0 (0)	$13,56 \pm 0,08$	161,7	51,69
6	89,1 (+1,41)	3,0 (0)	$5,77 \pm 0,05$	191,8	33,35
7	75 (0)	2,295 (-1,41)	$5,92 \pm 0,08$	181,1	29,40
8	75 (0)	3,705(+1,41)	$15,08 \pm 0,12$	174,1	58,72
9	75 (0)	3,0 (0)	$8,54 \pm 0,03$	172,2	47,17
10	75 (0)	3,0 (0)	$7,50 \pm 0,05$	178,1	44,54
11	75 (0)	3,0 (0)	$7,91 \pm 0,15$	171,4	44,36

Pelos resultados da Tabela 2, observa-se que a umidade do pó aglomerado variou de 5,77 % a 17,02 % (b.u.), a mediana do tamanho das partículas variou entre 143,1 μm e 191,8 μm e o rendimento do processo variou entre 26,52 % e 56,79 %. Apenas as condições dos ensaios 2, 5 e 8 resultaram em pós com umidade superior ao valor aceitável ( $\leq 10$  %), demonstrando que altas vazões de ligante (3,0 mL·min<sup>-1</sup>, 3,5 mL·min<sup>-1</sup> e 3,705 mL·min<sup>-1</sup>) aliadas a baixas temperaturas (65 °C,

60,9 °C e 75 °C) resultaram em pós com maior umidade. No entanto, as condições dos ensaios 2 e 8 proporcionaram os maiores valores de rendimento.

Durante o processo, a maior perda de material ocorreu devido ao arraste de partículas para o ciclone, que foi a principal causa do decréscimo no rendimento. Baixas vazões de ligante proporcionam menor umidade no interior do leito e um regime de fluidização intenso, aumentando a taxa de secagem. Com isso, a superfície das partículas pode não estar suficientemente molhada, já que a secagem pode ter ocorrido antes do ligante entrar em contato com o pó. Tais condições, dificultam a formação de pontes líquidas e, portanto, a formação dos grânulos. Como resultado, ocorre o arraste excessivo de finos para o ciclone, implicando em menores rendimentos e em pós mais secos. Tal constatação também foi observada por Porto *et al.* (2019), que estudaram a aglomeração do mesmo *blend* de proteínas utilizado neste trabalho com o mesmo ligante. Os autores reportaram valores de rendimento entre 31,03 % e 63,04 %, que são semelhantes os valores obtidos no presente trabalho. Os maiores valores de rendimento obtidos pelos autores podem ser explicados pelo fato de que foi utilizado um compressor para o fornecimento do ar de fluidização, o que provavelmente resultou em uma fluidização menos intensa e homogênea, proporcionando um menor arraste das partículas.

Contudo, verifica-se que a maioria dos valores de rendimento foi superior a 40 %, o que é satisfatório na aglomeração de pós finos. Vazões altas (3,705 mL·min<sup>-1</sup> e 3,5 mL·min<sup>-1</sup>) e intermediária (3,0 mL·min<sup>-1</sup>) aliadas a temperaturas intermediárias (75 °C e 85 °C) resultaram em maior rendimento, acima de 60 %. Altas vazões de ligante favorecem o umedecimento das partículas que prevalece sobre a secagem, levando a um regime de fluidização menos vigoroso quando comparado ao regime em baixas vazões, o qual foi observado visualmente. Esse tipo de regime evitou a perda de finos por arraste, resultando em maior rendimento.

Ainda, pelos resultados da Tabela 2, observa-se que todas as condições proporcionaram o aumento no tamanho das partículas, sendo de no mínimo 2 vezes maior que o tamanho inicial da matéria-prima, mostrando que a polpa de açaí atuou de forma satisfatória como ligante. Pelos resultados dos ensaios 9, 10 e 11 verifica-se que houve boa reprodutibilidade nos ensaios do ponto central, uma vez que as respostas estudadas apresentaram valores próximos.

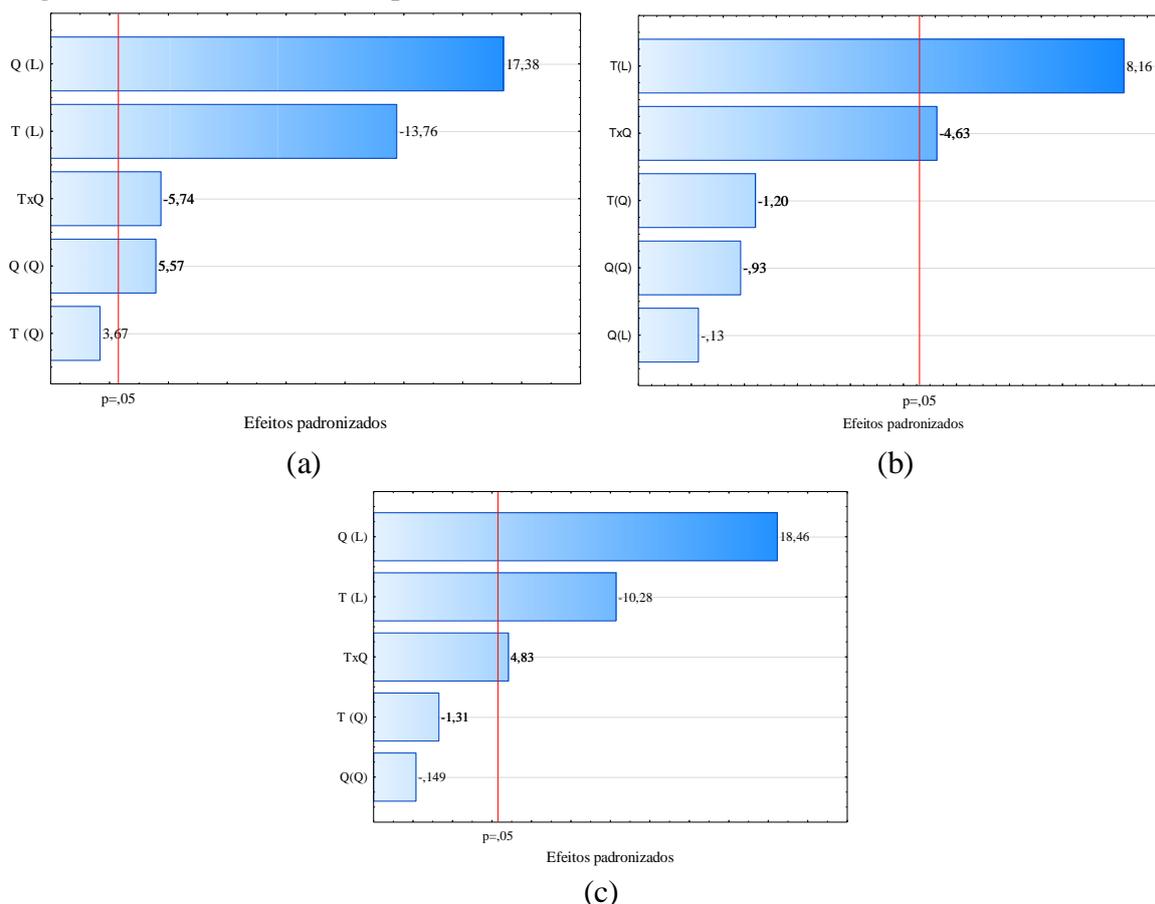
### Análise estatística

Pela análise estatística dos resultados foi possível determinar a significância dos efeitos das variáveis sobre as respostas. Os efeitos padronizados em valor absoluto estão ilustrados nos gráficos de Pareto mostrados na Figura 1, nos quais os efeitos estatisticamente significativos se localizam à direita do limiar de significância ( $p < 0,05$ ).

Pela Figura 1 observa-se que ambas as variáveis estudadas (T e Q) influenciaram significativamente nas respostas estudadas, indicando que variações na temperatura e na vazão podem alterar consideravelmente as respostas. Verifica-se ainda que o efeito linear da temperatura do ar, o efeito linear e quadrático da vazão de ligante e a interação entre essas variáveis apresentaram efeitos estatisticamente significativos para a umidade do pó, Figura 1 (a). Para o tamanho das partículas, Figura 1 (b) a temperatura do ar e a interação entre a temperatura e a vazão do ligante foram as variáveis que apresentaram efeito significativo. No que se refere ao rendimento, Figura 1 (c), os efeitos lineares da temperatura do ar e da vazão de ligante e a interação entre essas variáveis foram estatisticamente significativos para essa resposta.

Também, é possível notar que a vazão de ligante foi a variável com maior influência tanto sobre a umidade do pó quanto sobre o rendimento, o que é representado pelo maior valor absoluto do seu efeito. O efeito linear positivo dessa variável sobre essas respostas, indica que o aumento da vazão resulta em maiores rendimentos e em pós mais úmidos. Já para o tamanho das partículas, o efeito linear positivo da temperatura do ar indica que o aumento dessa variável resulta em maiores valores de tamanho.

Figura 1– Gráficos de Pareto para: (a) umidade, (b) mediana do tamanho e (c) rendimento.



Na Tabela 3 constam os valores calculados e tabelados do parâmetro F de Fisher. Para todas as respostas, verifica-se que para a regressão,  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$  o que atesta que os modelos são significativos. Para a falta de ajuste, constata-se que  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$  o que satisfaz a condição para os modelos serem preditivos. Portanto, as equações desses modelos podem ser consideradas significativas e usadas para fins preditivos. Os coeficientes de correlação ( $R^2$ ), que representam o ajuste do modelo aos dados experimentais, foram de 99,4 %, 73,2 % e 98,4 % para U,  $D_{50}$  e  $\eta$ , respectivamente.

Tabela 3 – Valores de F de Fisher para regressão, resíduos, falta de ajuste e erro puro.

Variável Resposta	$F_{R,r}$		$F_{aj,ep}$		$R^2$
	Calculado	Tabelado	Calculado	Tabelado	
Umidade (U)	164,96	5,05	0,47	19,16	0,994
Mediana do tamanho ( $D_{50}$ )	10,95	4,46	5,03	19,32	0,732
Rendimento ( $\eta$ )	90,83	4,53	1,45	19,25	0,984

As Equações 4, 5 e 6 representam os modelos para U,  $D_{50}$  e  $\eta$ , respectivamente.

$$U = 7,98 - 2,55x_1 + 3,22x_2 + 0,81x_1^2 + 1,23x_2^2 - 1,50x_1x_2 \quad (4)$$

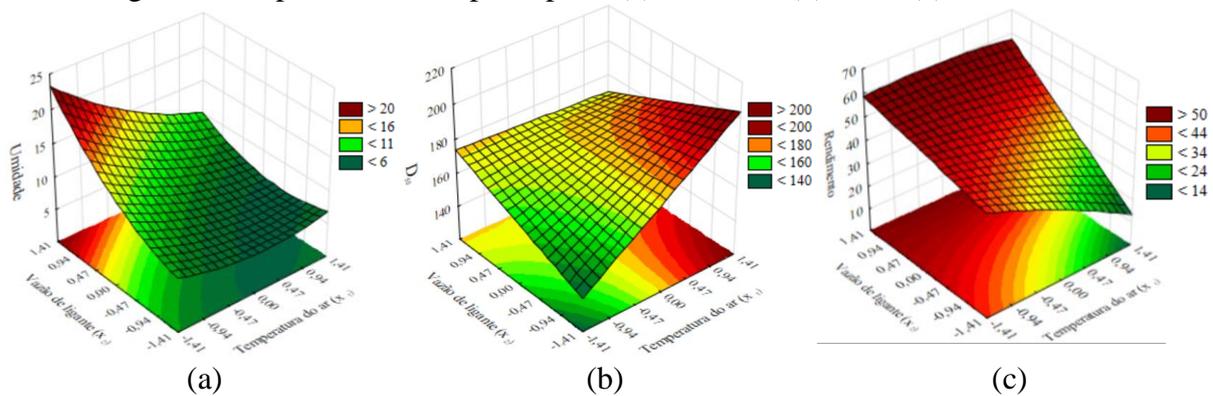
$$D_{50} = 171,55 + 10,57x_1 - 8,57x_1x_2 \quad (5)$$

$$\eta = 45,25 - 5,73x_1 + 10,28x_2 - 0,84x_1^2 + 3,80x_1x_2 \quad (6)$$

Na Figura 2 são apresentadas as superfícies obtidas para cada resposta. Observa-se pela Figura

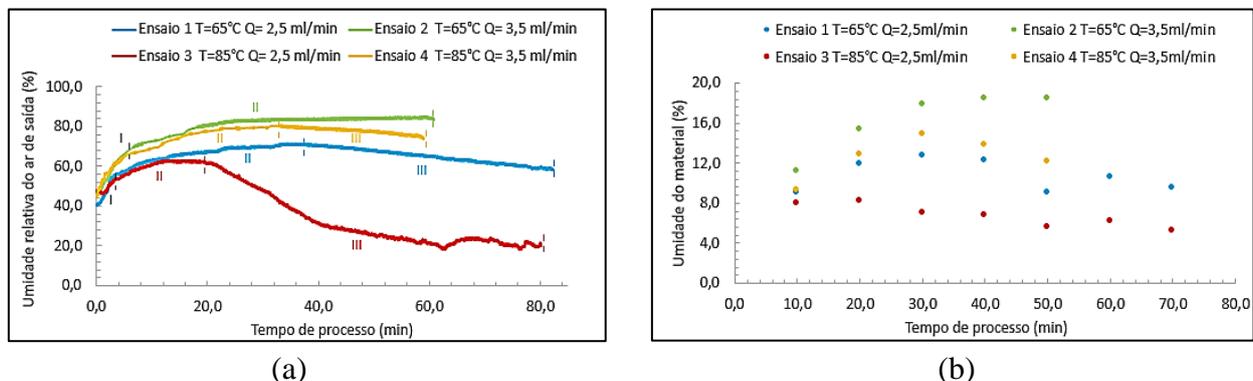
2 (c) que que maiores vazões de ligante favorecem o rendimento do processo. Contudo, vazões de ligante elevadas, para temperaturas abaixo de 75 °C, resultam em valores de umidade acima do requerido, conforme pode ser visto na Figura 2 (a). Vazões abaixo da região do ponto central proporcionam pós com umidade aceitável ( $\leq 10\%$ ). Contudo, essas condições resultam nos menores valores de rendimento, principalmente quando aliada a alta temperatura. Em relação ao tamanho das partículas, Figura 2 (b), verifica-se que altas temperaturas e baixas vazões resultam em maiores valores de  $D_{50}$ . Porém, essas condições proporcionaram os menores rendimentos.

Figura 2 – Superfícies de resposta para: (a) umidade, (b)  $D_{50}$  e (c) rendimento.



Os resultados de umidade, tamanho e rendimento podem ser melhor compreendidos pela análise da influência das variáveis (T e Q) sobre a evolução da umidade relativa do ar na saída do leito (Figura 3a) e sobre a evolução da umidade das partículas, avaliada a cada 10 minutos durante o processo (Figura 2b), para os ensaios 1 a 4. A umidade relativa do ar de entrada para os ensaios 1, 2, 3 e 4 foi em média 50,2 %, 77,4 %, 43,4 % e 57,2 %, respectivamente.

Figura 3 – Evolução da: (a) umidade relativa do ar na saída do leito e (b) umidade do material



O monitoramento da umidade relativa do ar na saída do leito e da umidade do material permitiu a identificação de três períodos distintos durante a aglomeração. No primeiro período (I), ocorre a rápida ascensão da umidade do ar devido ao umedecimento das partículas. Como a duração desse período é pequena em relação aos demais, provavelmente ocorreu pouca modificação no tamanho das partículas, predominando o fenômeno de nucleação. No segundo período (II), a umidade do ar atinge os maiores valores e permanece praticamente estável, apresentando um lento aumento com o tempo. A maior duração desse período, sob condições mais úmidas em relação ao primeiro, possivelmente possibilita um maior crescimento das partículas e a predominância dos fenômenos de coalescência e consolidação. No terceiro período (III), há uma redução significativa da umidade do ar, o que favorece a secagem das partículas, podendo ocorrer a redução de tamanho devido à quebra dos grânulos e a elutriação.

Pela Figura 3 (a) é possível observar que as condições do ensaio 2 resultaram apenas nos períodos I e II, já que por ser uma condição úmida (menor temperatura do ar e maior vazão de ligante),

esse ensaio não apresentou o período III, no qual a secagem predomina sobre o umedecimento das partículas. Como resultado, obteve-se um pó com maior umidade do que os demais (Figura 3b). Já as condições do ensaio 3, apesar de proporcionarem os três períodos, o período em que predomina a secagem (período III) iniciou antes do que nos demais ensaios e apresentou maior duração, resultado do uso de maior temperatura do ar e menor vazão de ligante, o que levou a uma maior taxa de secagem e, conseqüentemente, em um pó com menor umidade que os demais, Figura 3 (b).

Ao comparar os ensaios 1 e 2 observa-se que maior vazão de ligante (ensaio 2) resultou em maior umidade do ar, Figura 3 (a), e em maiores valores de umidade do pó, Figura 3 (b). A predominância de altos valores da umidade do ar durante todo o processo, favorece a coalescência entre partículas e consolidação, propiciando o crescimento das partículas e evitando a perda de finos por arraste, o que resultou em maior rendimento ( $\eta = 57\%$ ). No entanto, nessa condição, a umidade do material foi superior a umidade desejada. Já no ensaio 1, a umidade relativa do ar foi menor e o tempo de processo foi maior, devido ao uso de baixa vazão de ligante, levando a uma maior duração do período III, em que a secagem prevalece sobre o umedecimento, favorecendo o atrito e, conseqüentemente, a quebra e elutriação das partículas, resultando em menor rendimento ( $\eta = 45\%$ ) e em menores valores de umidade do material ao longo do processo. Comportamento semelhante é observado ao comparar os ensaios 3 e 4, Figura 3 (a). Menor vazão de ligante aliada à maior temperatura do ar (ensaio 3) favoreceu a secagem, o que levou à predominância do período III, resultando em menor rendimento ( $\eta = 26\%$ ) em relação ao ensaio 4 ( $\eta = 54\%$ ), no qual foram observados os três períodos, com predominância do período II. Esses ensaios resultaram em partículas com a mesma fluidez, porém com tempo de molhamento distintos, sendo o tempo de molhamento do ensaio 3 menor do que do ensaio 4. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que pó obtido no ensaio 3 apresentou menor umidade e maior tamanho. Além disso, como essa condição resultou no menor rendimento, possivelmente esse pó é mais homogêneo, favorecendo o molhamento.

#### Caracterização dos pós

Os resultados obtidos das análises de índice de Hausner (IH), índice de Carr (IC) nível de fluidez e tempo de molhamento ( $t_m$ ) para a matéria-prima e pós aglomerados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de IH, IC, nível de fluidez e tempo de molhamento

Ensaio	IH	IC	Nível de Fluidez	$t_m$ (s)
Matéria-prima	1,35±0,05	26,8± 1,40	Muito Ruim	214,70 ± 0,80
1	1,26±0,01	20,66±0,42	Tolerável	123,25 ± 0,35
2	1,39±0,02	28,23±1,22	Ruim	55,97 ± 2,16
3	1,29±0,01	22,55±0,80	Tolerável	71,60 ± 0,10
4	1,31±0,02	23,41±0,32	Tolerável	139,50 ± 1,13
5	1,33±0,04	24,64±0,14	Tolerável	82,50 ± 0,42
6	1,26±0,01	20,61±0,83	Tolerável	43,20 ± 2,83
7	1,30±0,01	22,79±0,12	Tolerável	89,50 ± 2,19
8	1,35±0,05	25,71±0,50	Ruim	59,85 ± 3,18
9	1,29±0,02	22,63±1,11	Tolerável	104,95 ± 4,31
10	1,29±0,03	22,50±2,02	Tolerável	75,43 ± 4,84
11	1,33±0,03	24,56±0,60	Tolerável	111,70 ± 2,00

Pelos resultados da Tabela 4 verifica-se que a aglomeração proporcionou pós com melhor fluidez e molhabilidade. Para a maioria dos pós aglomerados, o nível de fluidez foi alterado de “muito ruim” para “tolerável”, exceto para os ensaios 2 e 8, que resultaram em pós com fluidez “ruim”, o que pode ser atribuído aos altos valores de umidade desses pós. Em relação ao tempo de molhamento, para todos os ensaios, houve melhora considerável, com redução de 36 % até 80 %. Dacanal (2009)

também observou melhorias no tempo de molhamento dos produtos aglomerados em relação as suas matérias-primas. O pó aglomerado com menor redução do tempo de molhamento foi obtido no ensaio 4, levando cerca de 136 segundos para sua imersão, enquanto o pó aglomerado que apresentou maior redução (ensaio 6) levou cerca de 43 segundos.

## Conclusões

A aglomeração do *blend* de proteínas vegetais em leite fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante proporcionou o aumento do tamanho das partículas, resultando na melhora das propriedades físicas dos pós. Esse resultado indica que a polpa de açaí demonstrou ser um potencial ligante para a aglomeração de proteínas vegetais, viabilizando o uso desses pós proteicos em aplicações industriais e domésticas.

A análise estatística dos resultados mostrou que a vazão de ligante foi a variável operacional com maior efeito sobre a umidade do pó aglomerado e rendimento do processo, enquanto a temperatura do ar foi a variável com maior influência no tamanho das partículas. Com o monitoramento da umidade relativa do ar na saída do leite e da umidade do material foi possível concluir que alta vazão de ligante aliada à baixa temperatura do ar resultou na predominância do período II, em que predominam os fenômenos de coalescência e consolidação, acarretando maior rendimento. No entanto, essa condição resultou em um pó com umidade superior ao desejado. Dentro do domínio experimental estudado, a condição do ensaio 4 ( $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $Q = 3,5\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ) foi considerada a melhor condição no que se refere ao processo, uma vez que resultou em um dos maiores valores de rendimento e em um pó com umidade aceitável ( $\leq 10\%$ ). Já a condição do ponto central ( $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $Q = 3,0\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ) foi considerada a melhor em relação as propriedades físicas do pó, visto que resultou em uma melhora considerável em relação da fluidez e a molhabilidade, resultando também em um rendimento consideravelmente alto (média de 45 %) e em um pó com umidade aceitável (média de 7,98 %). Essa condição resultou em um pó aglomerado com mediana do tamanho de partícula ( $D_{50}$ ) de 2,4 vezes maior que o tamanho do pó inicial. O pó proteico obtido alia praticidade no preparo e consumo com qualidade nutricional e benefícios à saúde, com elevado potencial para a aplicação no desenvolvimento de produtos funcionais e formulações hipoalergênicas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (2018/10483-2) pelo auxílio financeiro e ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo suporte durante a realização dessa pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- Andreola, K. (2017) *Aglomeração de proteína concentrada de arroz em leite fluidizado: monitoramento in-line do tamanho das partículas*. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.
- Boye, J.; Zare, F.; Pletch, A. (2010) Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, **43**, 414-431.
- Brasil (2014) *Guia alimentar para a população brasileira*. Brasília: Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Atenção Básica, 2. ed., 156p.
- Custodio, G.R.; Souza, L.F.G; Nitz, M.; Andreola, K. (2020) A protein powder agglomeration process using açaí pulp as the binder: An analysis of the process parameters. *Advanced Powder Technology*, **31**, 3551-3561.
- Dacanal, G.C. (2009) *Aglomeração de polpa de acerola e proteína isolada de soja em pó em leite fluidizado cônico e pulsado*. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos.
- Da Silva, C.A.M.; Butzge, J.J.; Nitz, M.; Taranto, O.P. (2014) Monitoring and control of coating and granulation processes in fluidized beds – A review. *Advanced Powder Technology*, **25**, 195-210.

- Do Carmo, C.S.; Nunes, A.N.; Silva, I.; Maia, C.; Poejo, J.; Ferreira-Dias, S.; Nogueira, I.; Bronze, R.; Duarte, C.M.M. (2016) *Formulation of pea protein for increased satiety and improved foaming properties*. *RSC Adv.*, **6**, 6048-6057.
- Fao (2011) *Dietary protein quality evaluation in human nutrition*. Report of an FAO Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Paper, **92**, 1-66.
- Ferreira, A.C. ; Lee, C.H. ; Testa, V.A.G. ; Neto, V.J.C. (2019) *Estudo do processo de aglomeração de proteínas vegetais em leite fluidizado: uso de polpa de açaí como ligante e monitoramento das variáveis de processo*. Instituto Mauá de Tecnologia. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Química. São Caetano do Sul, SP.
- Han, S.; Chee, K.; Cho, S. (2015) Nutritional quality of rice bran protein in comparison to animal and vegetable protein. *Food Chemistry*, **172**, 766-769.
- Helm, R.M.; Burks, A.W. (1996) Hypoallergenicity of rice protein. *Cereal Foods World*, **41**, 839-842.
- Juliano, B.O. (1993) *Rice in human nutrition*. Rome: FAO. 168.
- Knight, P.C. (2001) Structuring agglomerated products for improved performance. *Powder Technology*, **119**, 14-25.
- Krefting, J. (2017) The Appeal of Pea Protein. *Journal of Renal Nutrition*, **27**, e31-e33.
- Kunii, D.; Levenspiel, O. (1991) *Fluidization Engineering*. New York: John Wiley, 2.ed., 489p.
- Litster, J.; Ennis, B. (2004) *The Science and Engineering of Granulation Processes*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 250p.
- Pedro, N. (2010) *Dieta vegetariana – factos e contradições*. Serviço de Medicina II dos Hospitais Universidade Coimbra, **17**, 173-178.
- Pietrysiaka, E.; Smith, D.M.; Smith, B.M.; Ganjyal, G.M. (2018) Enhanced functionality of pea-rice protein isolate blends through direct steam injection processing. *Food Chemistry*, **243**, 338-344.
- Porto, L.C.; Souza, L.F.G.; Masaoka, T.G.M.; Nitz, M.; Andreola, K. (2019) Aglomeração de proteínas vegetais em leite fluidizado: uso da polpa de açaí como ligante e análise das variáveis do processo. Anais do 11.º Seminário Mauá de Iniciação Científica. São Caetano do Sul, SP.
- Rogez, H. (2000) *Açaí: Preparo, Composição e Melhoramento da Conservação*. Belém-PA, Brasil, Ed. Universidade Federal do Pará.
- Saunders, R.M. (1990) The properties of rice bran as a food stuff. *Cereal Foods World*, **35**, 632-636.
- Shoji, Y.; Mita, T.; Isemura, M.; Mega, T.; Hase, S.; Isemura, S.; Aoyagi, Y. (2001) A fibronectin-binding protein from rice bran with cell adhesion activity for animal tumor cells. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, **65**, 1181-1186.
- Turchiuli, C.; Eloualia, Z.; Mansouri, N. E.; Dumoulin, E. (2005) Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. *Powder Technology*, **157**, 168-175, 2005.
- USP 37 (2014) *Powder flow*. United States Pharmacopeia. 37. ed. Rockville, MD, EUA.
- WHO (2018) *Saving lives, spending less: a strategic response to noncommunicable diseases*. Geneva, Switzerland. World Health Organization 2018 (WHO/NMH/NVI/18.8). Licence: CC BY-NC-AS 3.0 IGO.