

## PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DE UM PÓ A BASE DE AÇAÍ E PROTEÍNAS VEGETAIS OBTIDO POR SECAGEM EM *SPRAY DRYER*

GABRIELLA H. GUELFY, LUCIANE F. G. de SOUZA, MARCELLO NITZ, KACIANE ANDREOLA\*

Instituto Mauá de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química e de Alimentos  
\*e-mail: kaciane.andreola@maua.br

**RESUMO** - O processo de aglomeração em leito fluidizado é utilizado para melhorar as características físicas de pós. O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de aglomeração em leito fluidizado de um pó à base de açaí e proteínas vegetais obtido por secagem em *spray dryer*, a fim de melhorar suas propriedades físicas, bem como avaliar a influência das variáveis operacionais no desempenho do processo e na qualidade do pó. Por meio de planejamento fatorial, foi avaliada a influência da temperatura do ar e da vazão de ligante sobre a umidade do pó, tamanho das partículas e rendimento do processo. A temperatura do ar foi a variável com maior efeito na umidade, enquanto a vazão de ligante foi a variável com maior efeito no rendimento. A melhor condição de processo foi obtida no ensaio 2 ( $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $Q = 3,5\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ), visto que forneceu um pó com umidade aceitável ( $< 15\%$ ) e rendimento superior a  $55\%$ . Para todas as condições estudadas foi obtido um pó com melhor fluidez e menor tempo de molhamento, indicando que o processo de aglomeração resultou na melhora das propriedades físicas do pó obtido pela secagem em *spray dryer*.

### INTRODUÇÃO

O processo de *spray drying* consiste em uma secagem por atomização que se caracteriza pela transformação de um líquido em um pó. As gotículas de líquido atomizado entram em contato com um fluxo de ar quente, proporcionando uma rápida evaporação que permite manter a temperatura do produto baixa, sendo amplamente utilizado para substâncias termicamente sensíveis, com ampla aplicação na área alimentícia e farmacêutica. Como o produto obtido é um pó, esse processo propicia o aumento da vida útil e da estabilidade do produto (Ferrari *et al.*, 2012; Ré, 1998)

Contudo, alguns pós obtidos pela secagem por atomização apresentam propriedades físicas indesejáveis, como coesividade, higroscopicidade, baixa molhabilidade e dispersão em líquidos, causados principalmente pelo pequeno tamanho das partículas obtidas por esse

processo e pelo baixo peso molecular dos carboidratos presentes no pó, levando a dificuldades na manipulação, transporte e armazenamento (Cano-Chauca *et al.*, 2005).

Leitos fluidizados podem ser associados a equipamentos de *spray dryer*, de modo a permitir a aglomeração das partículas obtidas na secagem (Fuchs *et al.*, 2006). O processo de aglomeração é utilizado em diversas aplicações industriais, como por exemplo, na produção de leite em pó, achocolatados em pó e sopas instantâneas. Esse processo proporciona pós com melhores propriedades físicas em comparação aos pós obtidos na secagem por atomização, uma vez que os pós aglomerados apresentam melhor fluidez, molhabilidade, dispersão em líquidos e estabilidade (Dhanalakshmi *et al.*, 2011; Haas *et al.*, 2020).

O processo de aglomeração é comumente realizado em leito fluidizado, uma vez que esse equipamento proporciona elevadas taxas de transferência de massa e de calor (Kunni e Levenspiel, 1991). A aglomeração em leito

fluidizado consiste na atomização de um líquido ligante sobre a superfície de partículas, fluidizadas por ar quente. A colisão entre as partículas umedecidas leva à formação de pontes líquidas e, conseqüentemente, à coalescência das partículas. Com a secagem, as pontes se solidificam, levando à formação de partículas maiores, denominadas de aglomerados ou grânulos (Iveson *et al.*, 2001; Tan *et al.*, 2006).

Pós alimentícios obtidos na secagem por atomização tais como leite em pó, chás, café solúvel, preparados à base de cacau e formulações infantis, são exemplos de produtos que são submetidos a uma etapa de aglomeração durante o seu processamento, a fim de melhorar as suas propriedades físicas (Dacanal, 2005). Desse modo, é desejável o estudo do processo de aglomeração de outros tipos de pós finos, com foco em produtos procurados pelos consumidores atualmente.

Haas *et al.* (2020) estudaram o processo de aglomeração em leite fluidizado de pó cenoura concentrado obtido por secagem em *spray dryer*. O processo de aglomeração foi realizado durante 40 minutos utilizando água como ligante, com um fluxo de entrada de ar de 130 a 200 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> e temperatura do ar de entrada de 52 °C. A aglomeração do pó obtido por *spray dryer* proporcionou o aumento da vida útil do pó e melhorou características como fluidez e tempo de molhamento. Gong *et al.* (2007) estudaram a secagem em *spray dryer* de pó de *Myrica (bayberry)* e avaliaram a influência do processo de aglomeração sobre as propriedades de reconstituição do pó. A aglomeração foi realizada por 30 minutos, com temperatura do ar de entrada de 50 °C, sendo utilizado água como ligante. Os autores reportaram um aumento no tamanho das partículas o que resultou em uma melhora no tempo de molhamento e na reconstituição do pó.

A demanda por produtos que ofereçam valor nutricional, benefícios à saúde e praticidade no preparo e consumo tem crescido, devido às preocupações do consumidor com saúde e qualidade de vida, aliado a não disponibilidade de tempo para a preparação de alimentos (Dresch e Andrade, 2010). Nesse contexto, os pós proteicos instantâneos são uma alternativa para suprir essa demanda.

As proteínas vegetais, com ênfase para as proteínas de ervilha e de arroz, vêm ganhando destaque na formulação de novos produtos por serem hipoalergênicas e ricas em aminoácidos essenciais, possuindo propriedades nutritivas e funcionais e, portanto, benefícios à saúde (Saunders, 1990; Pietrysiaka *et al.*, 2018). A proteína de ervilha contém altas quantidades de lisina, mas baixas quantidades de metionina (Boye *et al.*, 2010), já a proteína de arroz é rica em metionina, mas apresenta baixa quantidade de lisina. Desse modo, a combinação dessas proteínas em proporções adequadas fornece a quantidade de aminoácidos essenciais recomendada à dieta (Fao, 2011; Pietrysiak *et al.*, 2018).

O açaí também tem apresentado uma procura elevada para a formulação de novos produtos, por ser um alimento altamente energético e apresentar propriedades nutracêuticas e benéficas à saúde humana. O açaí apresenta em sua composição quantidades significativas de compostos bioativos com propriedades antioxidantes, em especial, as antocianinas e outros compostos fenólicos (Tonon *et al.*, 2008; Schauss *et al.*, 2006). Estudos demonstraram que o consumo de açaí pode auxiliar na proteção das células humanas contra o estresse oxidativo, prevenindo diversas doenças crônicas, tais como diabetes e doenças cardiovasculares (Cedrim *et al.*, 2018).

O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de aglomeração em leite fluidizado de um pó à base de açaí e proteínas vegetais obtido por secagem em *spray dryer*, a fim de melhorar suas propriedades físicas, bem como avaliar a influência das variáveis operacionais no desempenho do processo e na qualidade do pó aglomerado.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Matéria-Prima

A matéria-prima utilizada no processo de aglomeração foi um pó à base de polpa açaí e proteínas vegetais de ervilha (Pea Unique 86, Pevesa Biotech, Espanha) e de arroz (Rice Standard 80, Wuxi Jinnong Biotechnology Co., Ltd, China) obtido por secagem em *spray dryer*.

Polpa de açaí (Açaí Rio Negro, Açaí Popular, Castanhal, PA) à temperatura

ambiente ( $\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) foi utilizada como ligante no processo de aglomeração.

### Secagem em *Spray Dryer*

Para a produção do pó foi formulada uma pasta contendo polpa de açaí, proteína isolada de ervilha e proteína concentrada de arroz, sendo as proteínas na proporção de 2:1. A concentração de proteínas na polpa de açaí foi de 12,5 %, de acordo com Grosso (2020) e Victorino *et al.* (2020).

Essa pasta foi submetida ao processo de secagem em *spray dryer* piloto de disco rotativo (SD-05, Tecnape, Piracicaba, SP). O processo foi realizado utilizando temperatura do ar de entrada de  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura do ar de saída de  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rotação do disco atomizador de 30000 rpm, abertura do ventilador adutor em 100 % e tempo de processo de aproximadamente 3 h, que foi a melhor condição operacional reportada por Victorino *et al.* (2020). Segundo os autores, o pó obtido nessas condições apresenta um teor de antocianinas de  $328,2 \pm 3,9\text{ mg}/100\text{g}$  (sólido seco de polpa de açaí). Detalhes do sistema experimental de *spray dryer* são reportados por Grosso (2020) e Victorino *et al.* (2020).

### Sistema Experimental – Leito Fluidizado

Os ensaios de aglomeração foram realizados em um leito fluidizado (Zelus, LF-50), formado por uma estrutura principal de base cônica unida a uma coluna cilíndrica. As partículas elutriadas foram coletadas por um ciclone. O ar de fluidização é fornecido por um compressor radial (IBRAM, modelo CR6) conectado a um inversor de frequência (WEG, modelo CFW300) e é aquecido por resistência elétrica controlada por regulador PID (Novus, N1100). Uma bomba peristáltica (Masterflex L/S 07551-20) transporta o ligante até o bico aspersor do tipo duplo fluido, localizado na parte superior do leito (*top-spray*). Detalhes do sistema experimental são descritos em Custodio *et al.* (2020). Na Figura 1 é apresentado o esquema do sistema experimental.

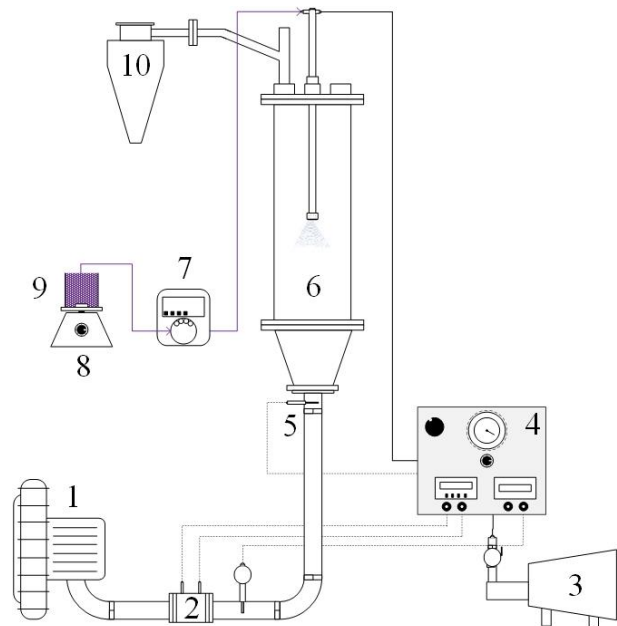


Figura 1: Esquema do sistema experimental. 1- compressor radial; 2- resistência elétrica; 3- compressor de pistão; 4- painel de controle; 5- termopar; 6- leito fluidizado; 7- bomba peristáltica; 8- agitador magnético; 9- reservatório do ligante; 10- ciclone.

### Ensaio Preliminares

Em ensaios preliminares verificou-se que não foi possível realizar a fluidização do pó obtido em *spray dryer*, ou seja, esse pó não apresentou movimentação no leito, independente da vazão do ar de fluidização. Desse modo, optou-se por realizar operações prévias à aglomeração em leito fluidizado, que foram a granulação via úmida em misturador planetário seguida da secagem em estufa, com o intuito de alterar as propriedades físicas do pó e, conseqüentemente, seu comportamento fluidodinâmico. A granulação via úmida foi realizada em misturador planetário (Gastromaq, BP06) por meio da aspersão do líquido ligante, a polpa de açaí, sobre o pó. Essa granulação foi realizada em 3 etapas iguais e consecutivas. Realizou-se a aspersão de 24 g do ligante, seguida da secagem em estufa (Nova Ética, 420.4D) a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 15 minutos. Após a granulação, o pó foi passado por uma peneira de *mesh* 9 (abertura de 2 mm) antes de ser inserido no leito fluidizado, de forma a retirar as partículas maiores, denominadas de torrões e evitar que esses ficassem no fundo da coluna durante o processo. Esse pó foi submetido ao processo de aglomeração em leito fluidizado.

## Ensaio de Aglomeração – Planejamento Experimental

Os ensaios de aglomeração foram realizados de acordo com um planejamento fatorial completo de dois níveis  $2^2$ , com triplicata no ponto central, totalizando 7 ensaios. As variáveis massa de material (0,300 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. As variáveis de entrada estudadas foram a temperatura do ar de fluidização ( $T$ ,  $X_1$ ) e a vazão de atomização do ligante ( $Q$ ,  $X_2$ ). A vazão do ar de fluidização iniciou em  $45 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , foi aumentada para  $63,5 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  após 10 minutos e foi novamente aumentada para  $78 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  após 10 minutos, sendo mantida constante até o final do processo. Como respostas do planejamento experimental foram analisadas a umidade do pó aglomerado ( $U$ ), o rendimento do processo ( $\eta$ ) e a mediana do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ). 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 12.0. considerando nível de confiança de 90 %.

Tabela 1: Variáveis operacionais e níveis do planejamento fatorial  $2^2$ .

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

T: temperatura do ar de fluidização; Q: vazão de atomização do ligante.

Foi proposto um modelo matemático para cada variável de resposta, sendo considerado como modelo mais adequado aquele em que o valor do  $R^2$  ajustado atingiu seu valor máximo com a eliminação dos fatores não significativos. Pelo teste F de Fischer, foi possível determinar a significância estatística dos modelos e a qualidade do ajuste. 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 que o valor de F tabelado. Para o modelo ser considerado preditivo, o valor de  $F_{raj,ep}$  calculado para verificar a falta de ajuste deve

apresentar um valor menor que o valor de F tabelado. Os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) de cada modelo também foram avaliados, sendo que valores próximos a unidade são considerados satisfatórios.

## Rendimento do Processo de Aglomeração

O rendimento do processo ( $\eta$ ) foi obtido pela 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.

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

A massa de sólidos adicionada ao leito ( $m_i$ ) é composta pela massa do pó e pela massa de sólidos do ligante (polpa de açaí). A massa de sólido remanescente no leito ao final dos experimentos ( $m_f$ ) refere-se à massa inicial adicionada ao leito excluindo-se a massa de material elutriado ( $m_e$ ), a massa de material incrustada nas paredes do leito ( $m_{inc}$ ) e a massa de torrões obtidos ao final do processo ( $m_t$ ). Ao final de cada experimento, o pó obtido foi passado por uma peneira de *mesh* 9 (abertura de 2 mm) para a retirada dos torrões.

## Caracterização dos Pós

A caracterização dos pós foi realizada por meio de análises de umidade, tamanho de partícula, fluidez e tempo de molhamento. Todas as análises foram realizadas em triplicata. As diferenças entre as médias dos resultados dos índices de Hausner e de Carr e do tempo de molhamento foram avaliadas estatisticamente por Análise de Variância (ANOVA), aplicando-se o teste de *Tukey* considerando nível de confiança de 95 %, com o auxílio do Minitab® 16.0 (Minitab Inc, USA). A umidade (% 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 15 % (b.u.), valor recomendado para farinhas (Anvisa, 2005). 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

determinado pelo índice de Hausner (HR) e pelo índice de compressibilidade de Carr (IC) (Turchiuli *et al.*, 2005), definidos a partir das densidades aparente e compactada. O equipamento utilizado para a compactação do pó foi o Tap-2SP Tap Density Tester (Logan Instruments CORP., New Jersey, USA), utilizando o método USP-I (1250 batidas, com  $14 \pm 2$  mm de altura e 300 batidas/min), realizado em triplicata (European Pharmacopeia, 2010). As partículas foram classificadas em diferentes categorias em relação ao escoamento segundo a Farmacopeia Americana (USP 37, 2014). O tempo de molhamento foi definido como o tempo necessário para o completo molhamento e imersão de 3,0 g de amostra do pó em 70 ml de água destilada a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ), conforme descrito por Hoge Kamp e Schubert (2003) e Custodio *et al.* (2020). O dispositivo utilizado na análise é semelhante ao utilizado por Andreola *et al.* (2018). O teste foi gravado e o vídeo foi tratado para uma determinação mais precisa do valor do tempo de molhamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Ensaio Preliminares

Os resultados de umidade (U), mediana do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ), índice de Hausner ( $I_{HR}$ ) e de Carr ( $I_C$ ), nível de fluidez e tempo de molhamento ( $T_m$ ) do pó obtido por secagem em *spray dryer* (SD) e do pó obtido na granulação via úmida em misturador planetário (GM) constam na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização dos pós SD e GM.

Propriedades	Pós	
	SD	GM
U (% b.u.)	$4,11 \pm 0,04$	$12,41 \pm 0,4$
$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	48,33	62,63
$I_{HR}$ (-)	$1,34 \pm 0,01$	$1,24 \pm 0,02$
$I_C$ (%)	$25,41 \pm 0,8$	$19,36 \pm 1,4$
Fluidez	Ruim	Razoável
$T_m$ (s)	$25,03 \pm 0,25$	$15,57 \pm 1,07$

Pelos resultados da Tabela 2, verifica-se que o pó obtido por secagem em *spray dryer* (SD) apresentou umidade de 4,11 %,  $D_{50}$  de

48,33  $\mu\text{m}$ , fluidez caracterizada como ruim e tempo de molhamento de 25 segundos. O pó obtido por Victorino *et al.* (2020), nas mesmas condições operacionais, apresentou valores semelhantes, sendo a umidade de 2,14 %, o  $D_{50}$  de 43,31  $\mu\text{m}$ , nível de fluidez muito ruim e tempo de molhamento de 39 segundos.

Também, observa-se que a granulação via úmida em misturador proporcionou a alteração nas características físicas do pó, resultando no aumento do tamanho das partículas, o que levou a uma melhora na fluidez e a diminuição do tempo de molhamento. O nível de fluidez foi alterado de ruim para razoável e a redução no tempo de molhamento foi de 38 %. Portanto, apesar do pó da granulação apresentar maior umidade em relação ao pó obtido em *spray dryer*, foi observada uma melhora considerável nas suas características físicas, o que modificou o comportamento fluidodinâmico do pó, possibilitando a sua fluidização. Portanto, esse pó foi submetido a aglomeração em leito fluidizado.

### Ensaio de Aglomeração

Os resultados de umidade (U) e mediana do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ) dos pós aglomerados em leito fluidizado e do rendimento do processo ( $\eta$ ) constam na Tabela 3. A umidade dos pós aglomerados variou entre 4,39 % e 9,53 %, a mediana do tamanho das partículas variou entre 76,81  $\mu\text{m}$  e 87,99  $\mu\text{m}$  e o rendimento variou entre 35,09 % e 55,74 %. Todas as condições operacionais estudadas resultaram em pós com umidade inferior ao valor estipulado como aceitável ( $\leq 15$  %) e proporcionaram o aumento no tamanho das partículas em relação ao tamanho do pó da granulação em misturador ( $D_{50GM} = 62,63 \mu\text{m}$ ). Pelos resultados dos ensaios 5, 6 e 7 verifica-se que houve boa reprodutibilidade nos ensaios do ponto central, uma vez que as respostas estudadas apresentaram valores próximos.

Os valores de rendimento estão dentro da faixa reportada na literatura para aglomeração de pós finos. Porto *et al.* (2022) estudaram o processo de aglomeração em leito fluidizado de um *blend* de proteínas vegetais e obtiveram valores de rendimento variando entre 31,03 % e 63,04 %.

Tabela 3: Matriz do planejamento experimental e resultados das respostas estudadas.

Ensaio	T (°C)	Q (mL·min <sup>-1</sup> )	U (%)	D <sub>50</sub> (µm)	η (%)
1	65	2,5	6,06 ± 0,06	82,44	44,11
2	65	3,5	9,53 ± 0,05	76,81	55,74
3	85	2,5	4,39 ± 0,2	84,66	35,09
4	85	3,5	4,93 ± 0,2	77,24	47,00
5	75	3,0	5,75 ± 0,1	80,05	49,67
6	75	3,0	5,71 ± 0,1	84,34	45,64
7	75	3,0	5,75 ± 0,1	87,99	46,16

Durante os ensaios, o arraste de partículas para o ciclone foi a principal causa do decréscimo do rendimento. Por se tratar de um pó de difícil fluidização, foi utilizada uma alta vazão do ar de fluidização, o que levou a um regime intenso de fluidização, favorecendo o arraste de partículas.

A condição do ensaio 2 (65 °C e 3,5 ml·min<sup>-1</sup>) resultou nos maiores valores de rendimento e umidade e no menor valor de mediana do tamanho das partículas. A alta vazão de ligante associada a baixa temperatura do ar favorece o umedecimento das partículas, 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. Entretanto, nessas condições o valor de D<sub>50</sub> foi o menor, visto que o umedecimento prevalece sobre a secagem, o que retarda a formação de pontes sólidas e, conseqüentemente, a formação dos grânulos.

Já na condição do ensaio 3 (85 °C e 2,5 ml·min<sup>-1</sup>) foram obtidos os menores valores de rendimento e umidade. A combinação de alta temperatura do ar e baixa vazão de ligante resulta em uma menor umidade no interior do leito e em um regime de fluidização intenso, o que favorece a secagem. Com isso, a secagem das gotículas do ligante pode ter ocorrido antes de entrar em contato com o pó, dificultando a formação de pontes líquidas e, portanto, a formação dos grânulos. Como resultado, ocorre o arraste excessivo de partículas para o ciclone,

implicando em menores rendimentos e em pós mais secos.

#### Planejamento Experimental - Análise Estatística

Pela análise estatística dos resultados foi possível determinar a significância dos efeitos das variáveis sobre as respostas estudadas. Os efeitos padronizados em valor absoluto estão ilustrados nos gráficos de Pareto apresentados na Figura 2. Os efeitos estatisticamente significativos se localizam à direita do limiar de significância ( $p < 0,10$ ). Verifica-se que as variáveis estudadas (T e Q) influenciaram significativamente sobre as respostas umidade do pó aglomerado e rendimento do processo.

A temperatura do ar foi a variável com maior influência sobre a umidade, enquanto o rendimento foi mais influenciado pela vazão do ligante, o que é representado pelo maior valor absoluto do efeito dessas variáveis.

Ainda, pela Figura 2, observa-se que o efeito significativo e negativo da temperatura do ar sobre a umidade e rendimento, indica que o aumento dessa variável proporciona uma diminuição da umidade do pó e do rendimento do processo. O aumento da temperatura favorece a etapa de secagem, resultando em pós com menor umidade, além de favorecer o arraste das partículas para o ciclone, prejudicando o rendimento do processo.

Já o efeito significativo e positivo da vazão de ligante sobre as respostas, mostra que o aumento da variável promove um aumento na umidade e no rendimento.

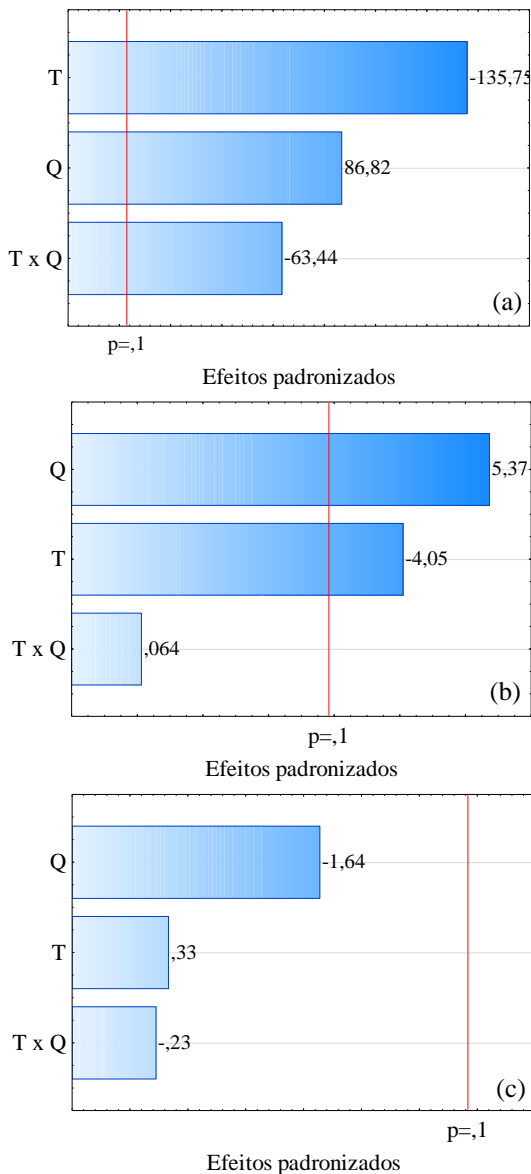


Figura 2: Gráficos de Pareto para: (a) umidade, (b) rendimento e (c) D<sub>50</sub>.

O aumento da vazão de ligante, favorece o umedecimento do pó e evita o arraste de partículas para o ciclone, o resulta em pós com maior umidade e em maior rendimento. Andreola (2017) também reportou a influência positiva do efeito da vazão de ligante sobre o rendimento do processo e a influência negativa do efeito da temperatura sobre a umidade do pó ao estudar a aglomeração de proteína concentrada de arroz em leite fluidizado.

No que se refere a mediana de tamanho das partículas (D<sub>50</sub>), observa-se que nenhuma das variáveis operacionais estudadas apresentou influência significativa sobre essa resposta.

Na Tabela 4 são apresentados os valores calculados e tabelados do parâmetro F de Fisher e os valores dos coeficientes de correlação (R<sup>2</sup>).

Tabela 4: Valores de F de Fisher para regressão, resíduos, falta de ajuste e erro puro.

Variável resposta	F <sub>R,r</sub>		F <sub>aj,ep</sub>		R <sup>2</sup>
	Calc.	Tab.	Calc.	Tab.	
U	38,63	5,39	774,86	8,53	0,97
η	30,15	4,32	0,50	9,00	0,94
D <sub>50</sub>	0,8	5,39	1,6	8,53	0

Calc.: calculado, Tab.: tabelado

Pelos resultados da Tabela 4, observa-se que os coeficientes de correlação (R<sup>2</sup>), que representam o ajuste do modelo aos dados experimentais, foram de 97 % e 94 % para a umidade e rendimento, respectivamente. Para os modelos de umidade e rendimento, constata-se que para a regressão, F<sub>calculado</sub> > F<sub>tabelado</sub>, o que atesta que os modelos são significativos. Analisando a falta de ajuste, verifica-se que apenas para o rendimento F<sub>calculado</sub> < F<sub>tabelado</sub>, satisfazendo a condição para o modelo ser preditivo. Portanto, as equações desses modelos podem ser consideradas significativas a 90 % de confiança, porém apenas a equação do rendimento pode ser utilizada para fins preditivos. Para a mediana do tamanho de partículas, o modelo apresentou R<sup>2</sup> nulo e a falta de ajuste foi significativa.

A Equação 2 representa o modelo obtido para o rendimento.

$$\eta = 46,20 - 4,44X_1 + 5,88X_2 \quad (2)$$

Para o modelo estatisticamente significativo e preditivo é possível plotar a superfície de resposta. Na Figura 3 é ilustrada a superfície de resposta para o rendimento. Observa-se que maiores vazões de ligante favorecem o rendimento do processo, principalmente se aliadas a temperaturas do ar entre 65 °C e 75 °C.

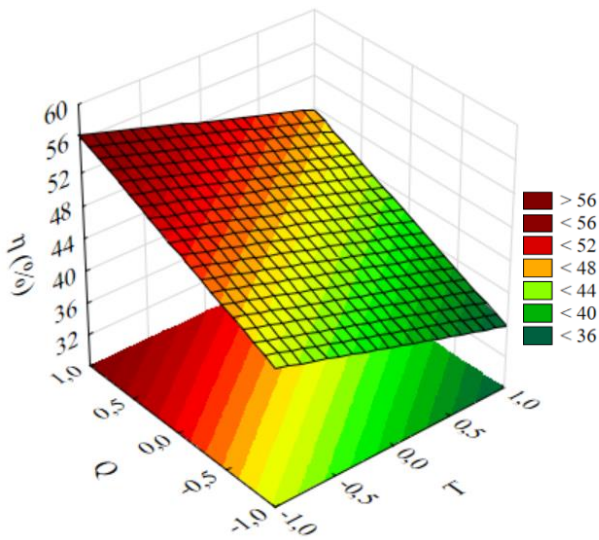


Figura 3: Superfície de resposta para o rendimento.

### Caracterização dos Pós

Os resultados do nível de fluidez, determinado pelo índice de Hausner ( $I_{HR}$ ) e pelo índice de Carr ( $I_C$ ) e do tempo de molhamento ( $T_m$ ) dos pós aglomerados em leito fluidizado estão apresentados na Tabela 5.

Pelos resultados da Tabela 5, verifica-se que o processo de aglomeração em leito fluidizado promoveu a melhora na fluidez e a diminuição do tempo de molhamento do pó. Para todos os pós, a fluidez foi alterada de ruim (pó obtido em *spray dryer* SD, Tabela 2) para boa. Os valores dos índices de Hausner e de Carr não apresentaram diferença significativa entre os ensaios.

Tabela 5: Valores de  $I_{HR}$ ,  $I_C$ , nível de fluidez e tempo de molhamento.

Ensaio	T (°C)	Q (ml·min <sup>-1</sup> )	$I_{HR}$ (-)	$I_C$ (%)	Fluidez	$T_m$ (s)
1	65	2,5	1,12 ± 0,03 <sup>a</sup>	10,92 ± 2,1 <sup>a</sup>	Boa	3,43 ± 0,15 <sup>b</sup>
2	65	3,5	1,14 ± 0,01 <sup>a</sup>	12,17 ± 0,61 <sup>a</sup>	Boa	5,47 ± 0,25 <sup>a</sup>
3	85	2,5	1,11 ± 0,01 <sup>a</sup>	10,05 ± 1,2 <sup>a</sup>	Boa	1,57 ± 0,15 <sup>d</sup>
4	85	3,5	1,14 ± 0,01 <sup>a</sup>	12,48 ± 1,0 <sup>a</sup>	Boa	1,60 ± 0,20 <sup>d</sup>
5	75	3,0	1,12 ± 0,02 <sup>a</sup>	11,03 ± 1,6 <sup>a</sup>	Boa	2,27 ± 0,15 <sup>c</sup>
6	75	3,0	1,12 ± 0,03 <sup>a</sup>	10,96 ± 2,9 <sup>a</sup>	Boa	2,20 ± 0,10 <sup>c</sup>
7	75	3,0	1,12 ± 0,01 <sup>a</sup>	10,57 ± 0,99 <sup>a</sup>	Boa	2,10 ± 0,10 <sup>c</sup>

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Para todos os ensaios, houve uma melhora considerável no tempo de molhamento, com redução de 78,15 % a 93,76 % em relação ao tempo de molhamento do pó obtido em *spray dryer* (SD). Haas *et al.* (2020) também reportaram que o processo de aglomeração em leito fluidizado de um pó concentrado de cenoura obtido em *spray dryer* proporcionou uma redução no tempo de molhamento do pó de 93,7 % e alteração na fluidez de ruim para razoável.

### CONCLUSÕES

O processo de aglomeração em leito fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante

se mostrou viável do ponto de vista operacional, uma vez que proporcionou o aumento do tamanho das partículas do pó obtido em *spray dryer*, resultando na melhora das propriedades físicas, viabilizando sua utilização em aplicações industriais e domésticas.

A análise estatística dos resultados mostrou que a temperatura do ar foi a variável com maior influência na umidade do pó, enquanto a vazão do ligante foi a variável com maior efeito sobre o rendimento do processo. Para a mediana do tamanho das partículas, nenhuma das variáveis foi considerada significativa. Dentro do domínio experimental estudado, a melhor condição no que se refere ao processo foi obtida no ensaio 2 (65 °C e



3,5 ml·min<sup>-1</sup>), visto que proporcionou o maior valor de rendimento, bem como um pó com umidade aceitável (< 15 %). Essa condição resultou em um pó com D<sub>50</sub> 1,59 vezes maior que o tamanho das partículas do pó obtido em *spray dryer*, além de apresentar melhora na fluidez do pó e uma redução de 78,15 % do tempo de molhamento. Já as condições dos ensaios 3 (85 °C e 2,5 ml·ml<sup>-1</sup>) e 4 (85 °C e 3,5 ml·ml<sup>-1</sup>) foram consideradas as melhores em relação as características físicas do pó, pois resultaram nos menores tempos de molhamento, com redução de 93,73 % e 93,61 %, respectivamente. No entanto, a condição do ensaio 4 resultou em um maior rendimento ( $\eta = 47,00$  %) em relação a condição do ensaio 3 ( $\eta = 35,09$  %), sendo, portanto, considerada mais adequada. Nessa condição, assim como na condição do ensaio 2, o pó aglomerado apresentou D<sub>50</sub> 1,59 vezes maior que o tamanho das partículas do pó obtido em *spray dryer*.

Os pós aglomerados obtidos aliam boas propriedades físicas com qualidade nutricional e benefícios à saúde, apresentando potencial para serem utilizados no desenvolvimento de produtos.

### 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

- ANDREOLA, K. (2017), Aglomeração de Proteína Concentrada de Arroz em Leito Fluidizado: Monitoramento In-line do Tamanho das Partículas. FEQ/UNICAMP - Campinas - SP, 281p. (tese de Doutorado).
- ANDREOLA, K.; SILVA, C. A. M. TARANTO, O. P. (2018), Agglomeration Process of Rice Protein Concentrate Using Glucomannan as Binder: In-line Monitoring of Particle Size, Chemical Engineering Research and Design, Vol 135, p. 37-51.
- ANVISA (2005), Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada. RDC n° 263. Regulamento Técnico para Produtos de Cereais, Amidos, Farinhas e Farelos [S.l.].
- BOYE, J.; ZARE, F.; PLATCH, A. (2010), Pulse Proteins: Processing, Characterization, Functional Properties and Applications in Food and Feed, Food Research International, Vol 43, p. 414-431.
- CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDAL, J. (2005), Effect of the Carriers on the Microstructure of Mango Powder Obtained by Spray Drying and its Functional Characterization, Innovative Food Science & Emerging Technologies, Vol 6, p. 420-428.
- CEDRIM, P. C. A. S.; BARROS, E. M. A.; NASCIMENTO, T. G. (2018), Propriedades Antioxidantes do Açaí (*Euterpe oleracea*) na Síndrome Metabólica, Brazilian Journal of Food Technology, Vol 21, e2017092, p. 1-7.
- 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, Vol 31, p. 3551 – 3561.
- DACANAL, G. C. (2005), Estudo da Granulação de Suco de Acerola Desidratado em Leito Fluidizado. FEA/UNICAMP - Campinas - SP, 112p. (dissertação de Mestrado).
- DHANALAKSHMI, K.; GHOSAL, S.; BHATTACHARYA, S. (2011), Agglomeration of Food Powder and Applications, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, Vol 51, p. 432–441.
- DRESCH, L. O.; ANDRADE, E. S. (2010), Evolução dos Hábitos Alimentares e a busca por Alimentos Saudáveis em Campo Grande, MS. Identificação de Tendências e Potencialidades, Anais do 48° SOBER - Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, P. 1-13, Campo Grande - MS.

- EUROPEAN PHARMACOPOEIA 7.0. (2010), Methods of Analysis. 2.9.3.4 Bulk Density and Tapped Density of Powders, p. 305-308.
- FAO (2011), Dietary Protein Quality Evaluation in Human Nutrition, Report of an FAO Expert Consultation, FAO Food and Nutrition Paper, Vol 92, p.1-66.
- FERRARI, C. C.; RIBEIRO, C. P.; AQUIRRE, J. M. (2012), Secagem por Atomização de Polpa de Amora-Preta Usando Maltodextrina como Agente Carreador, Brazilian Journal of Food Technology, Vol 15, p. 157-165.
- FUCHS, M.; TURCHIULI, C.; BOHIN M.; CUVELIER M. E.; ORDONNAUD C.; PEYRAT-MAILLARD M. N; DUMOULIN E. (2006), Encapsulation of Oil in Powder Using Spray Drying and Fluidised Bed Agglomeration, Journal of Food Engineering, Vol 75, p. 27-35.
- GONG, Z.; ZHANG, M.; MUJUMDAR A. S.; SUN J. (2007), Spray Drying and Agglomeration of Instant Bayberry Powder, Drying Technology, Vol 26, p.116-121.
- GROSSO, M. S. (2020), Estudo da secagem de polpa de açaí em *spray dryer*: utilização de mistura de proteínas vegetais de ervilha e de arroz como carreador. EQ/IMT - São Caetano do Sul - SP, 130p. (dissertação de Mestrado).
- HAAS, K.; DOHNAL, T.; ANDREU P.; ZEHETNER, E.; KIESSLICH, A.; VOLKERT, M.; FRYER, P.; JAEGER, H. (2020), Particle Engineering for Improved Stability and Handling Properties of Carrot Concentrate Powders Using Fluidized Bed Granulation and Agglomeration, Powder Technology, Vol 370, p. 104-115.
- HOGKAMP, S.; SCHUBERT, H. (2003), Rehydration of Food Powders, Food Science and Technology International, Vol 9, p. 223-235.
- IVESON, S. M.; LITSTER, J. D.; HAPGOOD, K.; ENNIS, B. J. (2001), Nucleation, Growth and Breakage Phenomena in Agitated Wet Granulation Processes: A Review, Powder Technology, Vol 117, p. 3-39.
- KUNIL, D.; LEVENSPIEL, O. (1991), Fluidization Engineering, John Wiley, New York.
- PORTO, L. C.; BARLETTA, L. G.; KOSUJI, E. Y.; SOUZA, L. F. G.; NITZ, M.; ANDREOLA, K. (2022) Influence of Process Parameters on Protein Powder Fluidized Bed Agglomeration and Drying Using Açaí Pulp as a Binder, Anais do IDS 2022 - 22<sup>nd</sup> International Drying Symposium, Worcester, USA.
- PIETRYSIAK, 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, Vol 243, p. 338-344.
- RÉ, M. I. (1998), Microencapsulation by Spray Drying, Drying Technology: An International Journal, Vol 16, p. 1195-1236.
- SAUNDERS R. M. (1990), The Properties of Rice Bran as a Food Stuff, Cereal Food World, Vol 35, p. 632- 636
- SCHAUSS, A. G.; WU, X.; PRIOR, R. L.; OU, B.; HUANG, D.; OWENS, J.; AGARWAL, A.; JENSEN, G. S.; HART, A. N.; SHANBROM, E. (2006), Antioxidant Capacity and Other Bioactivities of the Freeze-Dried Amazonian Palm Berry, Euterpe Oleraceae Mart. (Acai), Journal of Agricultural and Food Chemistry, Vol 54, p. 8604–8610.
- TAN, H.S.; SALMAN, A.D.; HOUNSLOW, M.J. (2006), Kinetics of Fluidised Bed Melt Granulation I: The Effect of Process Variables, Chemical Engineering Science, Vol 61, p. 1585-1601.
- TONON, R.; BRABET, C.; HUBINGER, M. (2008), Influence of Process Conditions on the Physicochemical Properties of Açaí (Euterpe Oleraceae Mart.) Powder Produced by Spray Drying, Journal of Food Engineering, Vol 88, p. 411-418.
- TURCHIULI, C.; ELOUALIA, Z.; MANSOURI, N. E.; DUMOULIN, E. (2005), Agglomeration: Agglomerates Shape and End-Use Properties, Powder Technology, Vol 157, p. 168-175.
- USP 37 (2014), Powder Flow, United States Pharmacopeia, Rockville, MD, EUA.

VICTORINO, B. R.; CASTELLI, G. G.;  
MANASTARLA, L. F.; MAKI, V. N.  
(2020), Secagem da Polpa de Açaí em  
Spray Dryer Utilizando Diferentes  
Carreadores. EQ/IMT - São Caetano do  
Sul - SP, 87p. (trabalho de Conclusão de  
Curso).