

ESTUDO DO PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DE PROTEÍNAS VEGETAIS EM LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO POLPA DE AÇAÍ COMO LIGANTE

Giovanna Rodrigues Custodio¹; Kaciane Andreola²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

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

Resumo *O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de aglomeração de um blend de proteínas vegetais em leito fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante, a fim de desenvolver um pó proteico instantâneo de elevado valor nutricional e com melhor fluidez. A influência da temperatura do ar e da vazão de ligante sobre a umidade final do pó, o tamanho das partículas e o rendimento do processo foi avaliada por meio de planejamento fatorial. A polpa de açaí atuou de forma satisfatória como ligante, proporcionando o aumento do tamanho das partículas. A vazão de ligante foi a variável com maior influência sobre a umidade e o rendimento, enquanto a temperatura do ar apresentou maior efeito no tamanho das partículas. A melhor condição de processo foi alcançada no ensaio do ponto central, visto que resultou em um pó com umidade aceitável ($\leq 10\%$) e com o dobro do tamanho inicial, além de fornecer rendimento superior a 75%. Nessa condição foi obtido um pó com melhor fluidez em relação a matéria-prima e com redução de cerca de 77% no tempo de instantaneização. O pó proteico obtido alia praticidade no preparo e consumo com qualidade nutricional e benefícios à saúde.*

Introdução

As proteínas de ervilha e de arroz são hipoalergênicas e ricas em aminoácidos essenciais, possuindo propriedades nutritivas e funcionais e, portanto, inúmeros benefícios para saúde (SAUNDERS, 1990; PIETRYSIACA *et al.*, 2018). Essas proteínas apresentam em sua composição os nove aminoácidos essenciais que o organismo humano não é capaz de sintetizar, mas 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 é rica em metionina, mas apresenta baixa quantidade de lisina. Desse modo, a combinação dessas proteínas em proporções adequadas, resulta em um balanço completo de aminoácidos, assegurando a quantidade suficiente de todos os aminoácidos essenciais necessários à dieta humana, de acordo com o recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2011; PIETRYSIACA *et al.*, 2018).

No entanto, a maioria dos pós proteicos de ervilha e arroz disponíveis no mercado apresentam partículas finas e coesivas, com baixa molhabilidade, fluidez e dificuldade de manipulação, o que dificulta sua utilização em aplicações industriais e domésticas.

O processo de aglomeração é amplamente utilizado para melhorar a molhabilidade, dispersão, fluidez e aparência de pós, o que ocorre devido ao aumento do tamanho das partículas e mudanças em suas propriedades físicas. Na aglomeração em leito fluidizado, a sucessão das etapas de umedecimento, colisão, consolidação, coalescência e secagem, ocasionada pela atomização de um ligante sobre partículas movimentadas por ar quente, resulta no aumento de tamanho das partículas (TURCHIULI *et al.*, 2013). A polpa de açaí é um potencial ligante para a aglomeração de pós proteicos, pois é rica em compostos bioativos, com ênfase para as antocianinas, que são antioxidantes naturais benéficos à saúde (SCHRECKINGER *et al.*, 2010), podendo agregar valor nutricional e funcional ao pó aglomerado, uma vez que os compostos bioativos da polpa podem ser incorporados no pó.

O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de aglomeração de um *blend* de proteínas vegetais em leito fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante, a fim de desenvolver um pó proteico instantâneo de elevado valor nutricional e com melhor fluidez.

Materiais e Métodos

Como matéria-prima dos experimentos de aglomeração foi utilizado um *blend* de proteínas vegetais em pó, que foi preparado misturando a proteína isolada de ervilha e a proteína concentrada de arroz (CA Gramkow Comércio Exterior Ltda) na proporção de 2:1. Essa proporção fornece as quantidades de metionina e lisina recomendadas pela FAO (2011). Polpa de açaí (DeMarchi) foi utilizada como agente ligante.

Sistema experimental

Os experimentos de aglomeração foram realizados em um leito fluidizado do tipo Wurster (Zelus, LF-50), o qual foi projetado para a realização de processos de recobrimento, conforme descrito por Albanez *et al.* (2012), que apresenta detalhes do equipamento. Portanto, foi necessário realizar algumas modificações no equipamento para estudar o processo de aglomeração. Com o intuito de promover uma distribuição uniforme do ar no leito foi utilizada uma placa distribuidora do tipo perfurada. Para evitar a passagem das partículas sólidas para a parte interna do equipamento, uma tela de aço inoxidável com abertura de 33,0 μm foi inserida na parte superior da placa distribuidora. A atomização do ligante foi realizada em modo contracorrente ao fluxo do ar de fluidização (*top-spray*). Para isso, o bico de atomização foi acoplado na parte superior do leito. Para a coleta das partículas elutriadas foi construído e utilizado um ciclone.

Um compressor (Termomecanica S/A, 15 hp) fornece o ar de fluidização, o qual é aquecido por resistência elétrica controlada por um regulador PID. O sistema possui um painel de controle para ajustar e monitorar as variáveis de processo. As vazões do ar de fluidização e do ar de atomização são reguladas por meio de válvulas. A temperatura do ar na entrada e saída do leito é monitorada por termopares. Uma bomba peristáltica (Decarf, Taitec) é utilizada para o transporte do ligante até o bico atomizador do tipo duplo fluido. Para realização da atomização do ligante na forma de gotículas, ar comprimido é inserido no bico.

Ensaio de aglomeração

O procedimento experimental consistiu, primeiramente, da alimentação do leito com o *blend* de proteínas em pó. Em seguida, foram acionados o compressor de ar e a resistência elétrica. Após cerca de 5 minutos de aquecimento do sistema, acionou-se a bomba peristáltica, iniciando-se a atomização do ligante. Os experimentos de aglomeração foram realizados a partir de um planejamento composto central rotacional (PCCR), com triplicata no ponto central, totalizando 11 ensaios. As variáveis de entrada estudadas foram: temperatura do ar de fluidização (T, X_1) e vazão de atomização do ligante (Q, X_2). Como respostas do planejamento foram analisadas a umidade final do pó aglomerado (U), a mediana do tamanho das partículas (D_{50}) e o rendimento do processo (η). As variáveis de entrada, com seus respectivos valores reais e codificados, são apresentadas na Tabela 1. O estudo do efeito das variáveis de entrada sobre as respostas foi realizado com auxílio do *software* Statistica® 8.0, 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 ⁻¹)	1,295	1,5	2,0	2,5	2,705

As variáveis operacionais mantidas fixas nos experimentos foram: massa de matéria-prima de 0,405 kg, pressão de atomização de 15 psi e quantidade de ligante atomizado de

100 mL. A vazão do ar de fluidização iniciou em $5 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ e foi aumentada a cada 10 min em incremento de $5 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ até $15 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. A partir desse ponto, o aumento ocorreu a cada 20 min até o final do ensaio. As variáveis de entrada e de resposta do PCCR e as variáveis fixadas foram definidas com base no conhecimento adquirido em experimentos exploratórios. Além disso, foram tomados como referência valores utilizados em trabalhos similares que estudaram o processo de aglomeração de pós proteicos em leito gás-sólido (ANDREOLA, 2017; NASCIMENTO, 2017; DACANAL e MENEGALLI, 2010; MACHADO *et al.*, 2014).

Para cada variável de resposta estudada no PCCR foi obtido um modelo polinomial. 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 determinação (R^2) de cada modelo.

O rendimento do processo (η) 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).

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

A massa de sólidos adicionada no leito (m_i) refere-se à massa de matéria-prima (*blend* de proteínas) e a massa de sólidos presente no ligante (polpa de açaí). A massa de sólidos remanescente no leito ao final dos experimentos (m_f) refere-se à massa inicial adicionada no leito excluindo 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 ($m_{torrões}$). A massa de pó obtida ao final de cada experimento foi passada por uma peneira com abertura de $850 \mu\text{m}$ e as partículas maiores que esse tamanho foram denominadas como torrões, o que foi definido com base nos resultados relatados por Andreola (2017).

Caracterização físico-química da matéria-prima e do pó aglomerado

A caracterização físico-química da matéria-prima e dos pós aglomerados foi realizada por meio de análises de umidade, tamanho e distribuição de tamanho de partículas, tempo de instantaneização e fluidez. A umidade foi determinada em analisador de umidade de halogênio (MOC63u, Schimadzu), realizando-se a calibração prévia deste equipamento com os resultados obtidos em estufa pelo método gravimétrico (AOAC, 1995). Os resultados foram tratados por meio de análise de variância (ANOVA), aplicando-se o Teste de *Tukey* para nível de significância de 5 %, com o auxílio do *software* Minitab® 16.0. Foi estipulado como aceitável um teor de umidade final igual ou inferior a 10 % (b.u.) para o pó aglomerado. Esse valor foi estipulado com base na umidade dos dois pós proteicos, segundo o laudo técnico do fabricante, a fim de assegurar o armazenamento seguro do produto. A distribuição de tamanho de partículas e os tamanhos nos percentis 10 %, 50 % (mediana) e 90 %, foram obtidos por difração a laser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments, UK) via úmida, utilizando etanol como meio líquido. Na análise de diâmetro de partículas por difração a laser, os percentis representam o diâmetro da esfera equivalente (do mesmo volume) abaixo do qual estão 90 %, 50 % e 10 % das partículas.

O tempo de instantaneização ou tempo de molhamento é o tempo necessário para a submersão completa de todas as partículas do pó após serem colocadas sobre a superfície de um líquido. O tempo de instantaneização foi determinado conforme descrito por Dacanal (2005). A fluidez, facilidade com que um determinado material particulado escoar, foi avaliada por meio do índice de compressibilidade de Carr (I_c), calculado conforme mostrado na

Equação 2 (EUROPEAN PHARMACOPOEIA, 2010). Para o cálculo deste índice, emprega-se a densidade aparente aerada (ρ_a), conhecida por *bulk density* e a densidade aparente na condição de máximo empacotamento (ρ_c), conhecida por *tapped density*, as quais foram obtidas de acordo com a Farmacopeia Europeia (EUROPEAN PHARMACOPOEIA, 2010).

$$I_c(\%) = \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \times 100 \quad (2)$$

O pó foi classificado em função de sua fluidez, conforme a Tabela 2, baseada na Farmacopeia Americana (USP 37, 2014) (TRIBOLI, 2014).

Tabela 2 - Escala de escoabilidade de pós.

Fluidez do pó	Índice de Compressibilidade (%)
Excelente	≤ 10
Boa	11 a 15
Razoável	16 a 20
Tolerável	21 a 25
Ruim	26 a 31
Muito ruim	32 a 37
Péssima	> 38

Fonte: (TRIBOLI, 2014).

Resultados e Discussão

Os valores de umidade da matéria-prima (*blend* de proteínas) determinados em estufa e no analisador de umidade foram de $6,60\% \pm 0,03^a\%$ (b.u.) e $6,70\% \pm 0,08^a\%$ (b.u.), respectivamente, que são valores iguais estatisticamente, confirmando a confiabilidade do resultado obtido pelo analisador. Os valores dos percentis D₁₀, D₅₀ e D₉₀ da matéria-prima foram de $21,448\ \mu\text{m} \pm 0,115\ \mu\text{m}$, $71,949\ \mu\text{m} \pm 0,244\ \mu\text{m}$ e $167,100\ \mu\text{m} \pm 1,612\ \mu\text{m}$, respectivamente. Tais valores indicam que 90 % das partículas possuem diâmetro menor que $167,100\ \mu\text{m} \pm 1,612\ \mu\text{m}$, 50 % possuem diâmetro menor que $71,949\ \mu\text{m} \pm 0,244\ \mu\text{m}$ e 10 % das partículas apresentam diâmetro menor que $21,448\ \mu\text{m} \pm 0,115\ \mu\text{m}$.

Os resultados de umidade final do pó aglomerado, mediana do tamanho das partículas e rendimento do processo para as condições estudadas no planejamento experimental são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de planejamento do PCCR e resultados das respostas estudadas.

Ensaio	T (°C)	Q (mL · min ⁻¹)	U (%)	D ₅₀ (μm)	η (%)
1	65 (-1)	1,5 (-1)	$9,36 \pm 0,22^f$	121,591	56,0
2	65 (-1)	2,5 (+1)	$15,31 \pm 0,19^b$	127,425	80,5
3	85 (+1)	1,5 (-1)	$10,51 \pm 0,06^e$	117,836	60,0
4	85 (+1)	2,5 (+1)	$12,54 \pm 0,30^c$	130,144	75,4
5	60,9 (-1,41)	2,0 (0)	$11,27 \pm 0,24^d$	103,216	74,3
6	89,1 (+1,41)	2,0 (0)	$10,26 \pm 0,19^e$	124,504	76,9
7	75 (0)	1,295 (-1,41)	$8,55 \pm 0,25^g$	120,568	76,7
8	75 (0)	2,705 (1,41)	$16,56 \pm 0,18^a$	166,319	82,2
9	75 (0)	2,0 (0)	$9,16 \pm 0,13^f$	134,776	76,7
10	75 (0)	2,0 (0)	$8,82 \pm 0,07^{fg}$	133,973	78,1
11	75 (0)	2,0 (0)	$9,32 \pm 0,19^f$	140,712	81,1

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

Pela Tabela 3, observa-se que a umidade do pó variou de 8,55 % a 16,56 % (b.u.), a mediana do tamanho variou entre 103,216 μm e 166,319 μm e o rendimento do processo variou entre 56,0 % e 82,2 %. Apenas a condição do ponto central e as condições dos ensaios 1 e 7 resultaram em pós com teor de umidade final inferior ao valor estipulado como aceitável (≤ 10 %). Vazões de ligante baixas (1,295 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e 1,5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) e intermediária (2,0 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) resultaram em pós com menor umidade.

Em relação ao rendimento, foram obtidos valores acima de 50 % em todas as condições estudadas, o que é satisfatório na aglomeração de pós finos, sendo a maioria dos valores superior a 70 %. 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. O maior rendimento (82,2 %) foi obtido com o uso de alta vazão de ligante (2,705 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$), o que também resultou em maior umidade do pó (16,56 %). Alta vazão favorece o umedecimento das partículas, que prevalece sobre a secagem. Nessa condição verificou-se, visualmente, que o regime de fluidização foi menos vigoroso em relação às baixas vazões, evitando a perda de finos por arraste, o que resultou em maior rendimento. Já, o uso de baixa vazão proporciona menor umidade no interior do leito, aumentando a taxa de secagem. Com isso, as partículas podem não estar suficientemente molhadas, dificultando a formação de pontes líquidas entre partículas e, portanto, a formação dos grânulos. Como resultado ocorre o arraste excessivo de finos, implicando em menor rendimento e em um pó mais seco.

Ainda pela Tabela 3, nota-se que todas as condições estudadas proporcionaram um aumento no tamanho das partículas, sendo no mínimo 1,4 vezes maior que o tamanho (mediana) da matéria-prima (71,949 $\mu\text{m} \pm 0,244$). Esse resultado demonstra que o processo de aglomeração do *blend* de proteínas vegetais usando polpa de açaí como ligante foi satisfatório. Também, verifica-se que o tamanho das partículas aumentou com o acréscimo da vazão de ligante, de modo que um dos maiores valores de tamanho (166,319 μm) foi obtido no nível superior dessa variável (+1,41, ensaio 8).

Pelos ensaios 9, 10 e 11 constata-se que houve boa reprodutibilidade nos pontos centrais do planejamento, uma vez que as respostas estudadas apresentaram valores próximos.

A partir da análise estatística dos resultados foi possível determinar a significância dos efeitos das variáveis sobre as respostas, que constam na Tabela 4. Os efeitos padronizados estão ilustrados nos gráficos de Pareto apresentados na Figura 1, nos quais os efeitos estatisticamente significativos se localizam à direita do limiar de significância ($p < 0,05$).

Tabela 4 - Estimativa dos efeitos para as variáveis de resposta estudadas no PCCR.

Fatores	U (%)		D ₅₀ (μm)		η (%)	
	Efeito \pm s	p	Efeito \pm s	p	Efeito \pm s	p
Média	9,100 \pm 0,147	<0,001	136,487 \pm 2,125	<0,001	78,633 \pm 1,297	<0,001
T (L)	-0,762 \pm 0,180	0,052	7,267 \pm 2,603	0,108	0,644 \pm 1,589	0,724
T (Q)	1,800 \pm 0,215	0,014	-24,828 \pm 3,098	0,015	-7,808 \pm 1,891	0,053
Q (L)	4,826 \pm 0,180	0,001	20,711 \pm 2,603	0,015	11,919 \pm 1,589	0,017
Q (Q)	3,590 \pm 0,215	0,003	4,755 \pm 3,098	0,264	-3,958 \pm 1,891	0,171
T \times Q	-1,960 \pm 0,255	0,016	3,237 \pm 3,681	0,472	-4,550 \pm 2,247	0,180

Os valores estatisticamente significativos estão em negrito; p: probabilidade de significância; s: desvio padrão.

Pelos resultados da Tabela 4 e Figura 1 verifica-se que ambas as variáveis estudadas (T e Q) influenciaram significativamente na umidade e no tamanho das partículas (mediana).

Já, o rendimento é influenciado apenas pela vazão de ligante. Observa-se ainda que, o efeito linear da vazão de ligante apresenta influência positiva sobre as respostas, indicando que o aumento dessa variável proporciona um aumento na umidade, no tamanho das partículas e no rendimento do processo. Dacanal e Menegalli (2010) também reportaram a influência positiva do efeito da vazão de ligante sobre a umidade do pó e rendimento do processo ao estudarem a aglomeração de proteína isolada de soja em leite fluidizado pulsado.

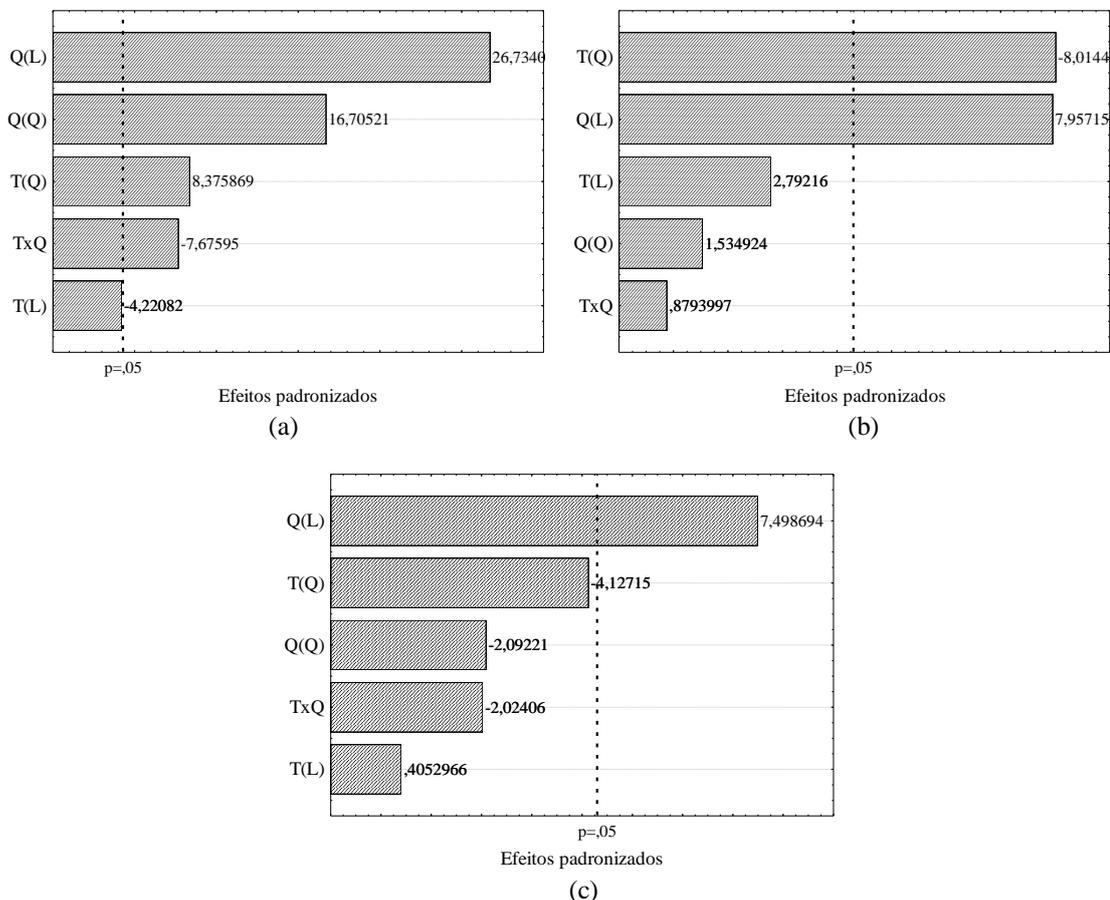


Figura 1: Gráficos de Pareto para as respostas: (a) umidade, (b) mediana do tamanho das partículas e (c) rendimento do processo.

Também, pelos resultados da Tabela 4 e Figura 1, é possível constatar que o efeito quadrático da temperatura do ar foi estatisticamente significativo para as respostas umidade e tamanho das partículas, indicando que variações em sua faixa altera significativamente essas respostas. Verifica-se ainda, que a vazão de ligante foi a variável operacional com maior influência sobre as respostas umidade e rendimento, o que é representado pelo maior valor absoluto do seu efeito, enquanto para o tamanho das partículas, a temperatura do ar foi a variável com maior efeito, o qual foi um pouco superior ao efeito da vazão de ligante.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de F de Fisher calculados e tabelados. Em relação as repostas umidade e tamanho das partículas, verifica-se que para a regressão, $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ o que atesta que os modelos são significativos. Analisando a falta de ajuste, constata-se que $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$ o que satisfaz a condição para esses modelos serem preditivos. Portanto, as equações desses modelos podem ser consideradas significativas a 95% de confiança e usadas para fins preditivos. Os coeficientes de correlação (R^2), que representam o ajuste do modelo aos dados experimentais, foram 97,6 % e 80,2 % para a umidade e tamanho das partículas, respectivamente. Para a resposta rendimento, o coeficiente de correlação foi de 51,3 % e o modelo não foi considerado significativo. Desta maneira, não foi possível propor um modelo que represente esta resposta.

Tabela 5 - 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	42,01	5,05	7,93	19,16	0,976
Tamanho (mediana)	9,45	4,53	6,99	19,30	0,802
Rendimento	1,05	5,05	17,03	19,16	0,513

As Equações 3 e 4 representam os modelos estatísticos para a umidade e mediana do tamanho das partículas, respectivamente.

$$U = 9,10 - 0,38X_1 + 2,41X_2 - 0,98X_1X_2 + 0,90X_1^2 + 1,79X_2^2 \quad (3)$$

$$D_{50} = 138,73 + 3,63X_1 + 10,35X_2 - 13,11X_1^2 \quad (4)$$

Confirmada a significância estatística dos modelos, é possível gerar as superfícies de resposta. Para o rendimento, a constatação de um modelo não significativo impossibilita a utilização do mesmo para fins de predição, contudo, não invalida a utilização da superfície de resposta como uma forma de avaliar a tendência do rendimento do processo conforme as variáveis são alteradas. As superfícies de resposta estão ilustradas na Figura 2.

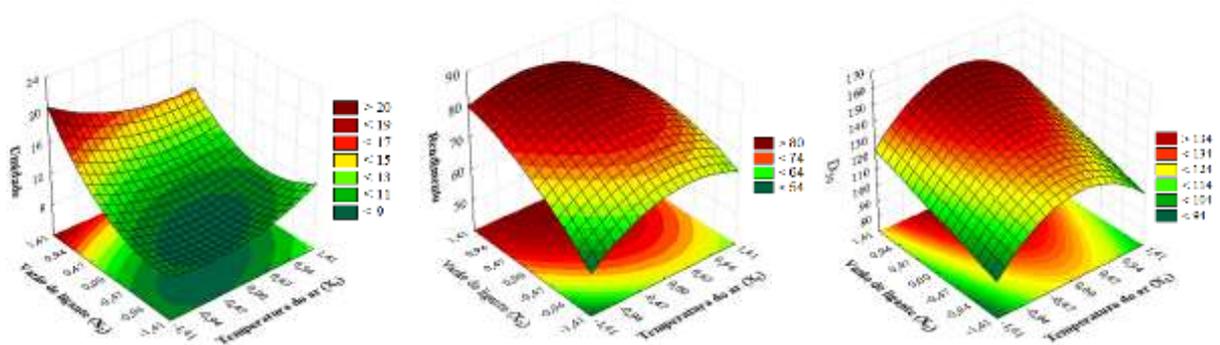


Figura 2 - Superfícies de resposta para: (a) umidade (%), (b) mediana do tamanho das partículas ($D_{50} \mu\text{m}$) e (c) rendimento do processo ($\eta\%$).

Pelas superfícies de resposta, Figura 2, é possível observar que maiores vazões de ligante favorecem o rendimento do processo e a formação de grânulos maiores, principalmente quando aliadas a valores de temperatura próximos a região do ponto central.

Maior vazão de ligante aumenta a quantidade de ligante disponível no interior do leito, para um mesmo tempo de processo. Com isso, a adesão e coalescência entre as partículas é favorecida, proporcionando maiores taxas de crescimento. Um rápido aumento do tamanho das partículas leva a menores taxas de arraste do material e, portanto, em maior retenção de material no interior do leito, resultando em maiores valores de rendimento (ANDREOLA, 2017). Contudo, vazões de ligante elevadas, principalmente quando a temperatura do ar é baixa, proporcionam o aumento do conteúdo de umidade que pode prejudicar a vida de prateleira do pó.

Portanto, a condição do ponto central ($T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) proporcionou os melhores resultados, uma vez que nessa condição foi obtido um pó aglomerado com umidade

aceitável ($\leq 10\%$), elevado rendimento (acima de 75%) e tamanho de partícula maior do que nas demais condições em que a umidade também foi aceitável (ensaios 1 e 7).

As curvas de distribuição de tamanho para a matéria-prima e para os pós obtidos na condição do ponto central (média dos valores dos três ensaios) são mostradas na Figura 3.

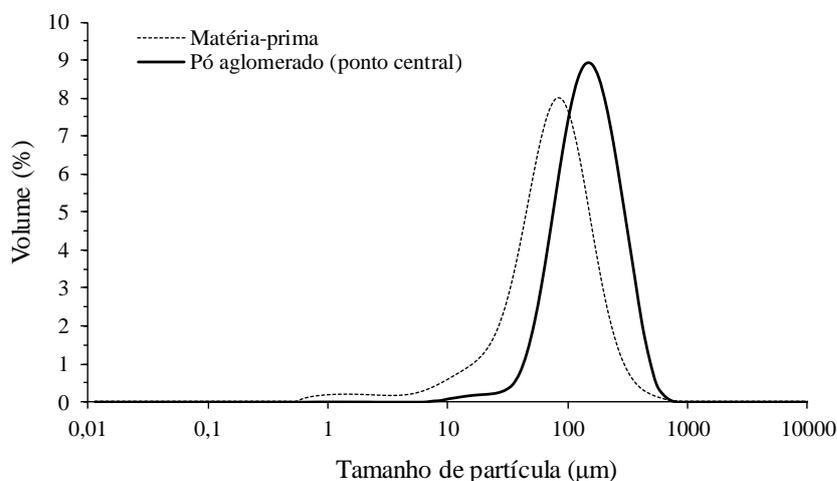


Figura 3 - Curvas de distribuição de tamanho de partícula para a matéria-prima e para os pós obtidos na condição do ponto central (média dos valores).

Pela Figura 3, verifica-se que para a matéria-prima, as menores partículas têm por volta de 0,7 μm e as maiores cerca de 800 μm , demonstrando uma ampla distribuição de tamanho, o que dificulta a aglomeração e favorece o arraste das partículas para o ciclone, principalmente, nos momentos iniciais do processo. Para os pós obtidos na condição do ponto central as menores partículas têm em média cerca de 10 μm e as maiores 800 μm . Esses resultados e o deslocamento da curva, confirmam o aumento do tamanho das partículas após a aglomeração, embora ainda existam partículas finas no pó aglomerado.

O índice de Carr (I_c), níveis de fluidez e o tempo de instantaneização (t_i) obtidos para a matéria-prima e para os pós aglomerados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de I_{Carr} e tempo de instantaneização para a matéria-prima e pós aglomerados.

Ensaio	T ($^{\circ}\text{C}$)	Q ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	I_c (%)	Fluidez (I_c)	t_i (s)
MP	-	-	$26,1 \pm 2,8$	Ruim	$205,5 \pm 5,0^a$
1	65 (-1)	1,5 (-1)	$13,4 \pm 1,9$	Boa	$73,7 \pm 3,2^d$
2	65 (-1)	2,5 (+1)	$29,7 \pm 1,4$	Ruim	$74,7 \pm 2,1^d$
3	85 (+1)	1,5 (-1)	$23,6 \pm 0,8$	Tolerável	$136,7 \pm 2,5^b$
4	85 (+1)	2,5 (+1)	$23,0 \pm 1,2$	Tolerável	$74,0 \pm 4,0^d$
5	60,9 (-1,41)	2,0 (0)	$26,9 \pm 0,6$	Ruim	$116,0 \pm 4,0^c$
6	89,1 (+1,41)	2,0 (0)	$21,4 \pm 1,0$	Tolerável	$125,7 \pm 5,1^{bc}$
7	75 (0)	1,295 (-1,41)	$25,1 \pm 0,6$	Tolerável	$64,3 \pm 6,5^d$
8	75 (0)	2,705 (1,41)	$29,7 \pm 1,1$	Ruim	$32,7 \pm 1,1^f$
9	75 (0)	2,0 (0)	$21,4 \pm 2,6$	Tolerável	$50,7 \pm 4,0^e$
10	75 (0)	2,0 (0)	$20,7 \pm 0,6$	Tolerável	$43,3 \pm 2,1^{ef}$
11	75 (0)	2,0 (0)	$22,8 \pm 1,4$	Tolerável	$46,3 \pm 3,8^e$

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

Pelos resultados da Tabela 6, verifica-se que, para a maioria dos pós, o nível de fluidez foi alterado de ruim para tolerável, o que demonstra que a aglomeração proporcionou uma melhora no nível de fluidez do pó. Esse resultado é satisfatório, visto que a fluidez apresenta um papel importante na aplicação do pó e no seu desempenho durante as operações industriais. Uma melhor fluidez facilita o manuseio, processamento, armazenamento e o transporte do pó (PRESCOTT e BARNUM, 2000). O pó com menor valor de D_{50} (ensaio 5) e os pós com maior umidade (ensaios 8 e 2) apresentaram nível de fluidez igual ao da matéria-prima, ou seja, mantiveram a classificação de nível de fluidez ruim. Tais resultados demonstram que o tamanho das partículas e a umidade afetaram o nível de fluidez do pó aglomerado.

Ainda, pelos resultados da Tabela 6, observa-se que o tempo de instantaneização da matéria-prima foi de $205,5 \text{ s} \pm 5,0 \text{ s}$, enquanto que, para os pós aglomerados, o tempo de instantaneização variou entre 32,7 s e 136,7 s. A maioria dos pós aglomerados apresentou melhor molhabilidade do que o pó inicial, demonstrado pelo decréscimo no tempo de instantaneização. O pó com maior valor de D_{50} ($166,319 \mu\text{m}$ - ensaio 8) apresentou o menor tempo de instantaneização, no entanto, o nível de fluidez desse pó foi classificado como ruim, devido a elevada umidade (16,56 %). Os pós obtidos na condição do ponto central também apresentaram baixos tempos de instantaneização comparados aos demais pós. Tais resultados mostram que, de modo geral, maior tamanho de partícula resultou em menor tempo de instantaneização. Segundo Freudig *et al.* (1999), o espaço intersticial das partículas grandes e irregulares facilita a penetração da água no interior da estrutura porosa, favorecendo a molhabilidade. Outros autores também verificaram a melhora no nível de fluidez e o decréscimo do tempo de instantaneização com o aumento do tamanho de partículas de pós alimentícios após o processo de aglomeração (ANDREOLA *et al.*, 2018; DACANAL e MENEGALLI, 2010; MACHADO *et al.*, 2014).

Em relação as propriedades físicas, pode-se inferir que a condição do ponto central proporcionou resultados satisfatórios para a fluidez e tempo de instantaneização.

Portanto, analisando os resultados de umidade, tamanho de partículas e rendimento do processo, juntamente com os resultados das propriedades físicas do pó, considera-se que a melhor condição de processo foi alcançada no ensaio do ponto central, em que foi utilizada temperatura do ar de $75 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão de ligante de $2,0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

Conclusões

O processo de aglomeração em leito fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante resultou em pós proteicos com melhores propriedades físicas, viabilizando sua utilização em aplicações industriais e domésticas. A polpa de açaí foi um ligante adequado para a aglomeração do blend de proteínas vegetais, pois proporcionou o aumento do tamanho das partículas. A análise estatística dos resultados mostrou que a vazão de ligante foi a variável operacional com maior influência na umidade do pó aglomerado e no rendimento do processo, enquanto a temperatura do ar foi a variável com maior efeito sobre o tamanho das partículas. Dentro do domínio experimental estudado, a melhor condição foi alcançada no ensaio do ponto central, visto que resultou em um pó com umidade aceitável ($\leq 10 \%$) e com o dobro do tamanho inicial, além de fornecer rendimento superior a 75 %. Nessa condição foi obtido um pó com melhor fluidez em relação a matéria-prima e com redução de cerca de 77 % no tempo de instantaneização. O pó proteico obtido alia praticidade no preparo e consumo com qualidade nutricional e benefícios à saúde, possuindo elevado potencial para a aplicação no desenvolvimento de produtos funcionais e formulações hipoalergênicas.

Referências Bibliográficas

- Albanez, R. (2012) *Recobrimento gastrorresistente de pellets de diclofenaco de sódio em leite fluidizado tipo Wurster*. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.
- 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.
- 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*, 135, 37-51.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. *Official methods of analysis of AOAC International*. (16 ed.). Washington, 1995.
- 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.
- Dacanal, G.C.; Menegalli, F. C. (2010) Selection of operational parameters for th production of instant soy protein isolate by pulsed fluid bed agglomeration. *Powder Technology*, 203, 565-573.
- European Pharmacopoeia 7.0 (2010) *Methods of analysis*. 2.9.3.4 Bulk density and tapped density of powders, 305-308.
- Fao (2011) *Dietary protein quality evaluation in human nutrition*. Report of an FAO Expert Consultation, FAO Food and Nutrition Paper, 92, 1-66.
- Freudig, B.; Hogekamp, S.; Schubert, H. (1999) Dispersion of powders in liquids in a stirred vessel. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 38, 525-532.
- Machado, V.G.; Hirata, T.A.M.; Menegalli, F.C. (2014) Agglomeration of soy protein isolate in a pulsed fluidized bed: Experimental study and process optimization. *Powder Technology*, 254, 248-255.
- Nascimento, R.F. (2017) *Estudo do processo de aglomeração de proteína isolada de ervilha em leite fluidizado pulsado*. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.
- 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*, 243, 338-344.
- PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A. On powder flowability. *Pharmaceutical Technology*, v. 24, n. 10, p. 60-85, 2000.
- Saunders, R.M. (1990) The properties of rice bran as a food stuff. *Cereal Foods World*, 35, 632-636.
- Schreckinger, M.E.; Lotton, J.; Lila, M.A.; de Mejia, E.G. (2010) Berries from South America: A Comprehensive Review on Chemistry, Health Potential, an Commercialization. *Journal of Medicinal Food*, 2, 233-246.
- Triboli, E.P.D.R. (2014) *Estudo e otimização de processo de secagem de iogurte por atomização com secador em escala piloto*. Universidade de São Paulo. São Paulo. Tese de Doutorado.
- Turchiuli, C.; Samil, R.; Dumoulin, E. (2013). Fluidized bed agglomeration of skim milk powder: Analysis of sampling for the follow-up of agglomerate growth. *Powder Technology*, 238, 161-168.