

ESTUDO DO PROCESSO DE RECOBRIMENTO DE PARTÍCULAS DE CAFÉ VERDE EM LEITO FLUIDIZADO

Lethicia Gaiara Barletta¹; Luisa Ambrosio Barbosa¹; Luciane Franquelin Gomes de Souza²; Tatiana Guinoza Matuda Masaoka²; Marcello Nitz²; Kaciane Andreola²

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

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

Resumo. *Os grãos de café verde são ricos em compostos fenólicos com ênfase para os ácidos clorogênicos (ACGs), cujas propriedades antioxidantes são perdidas durante o processo de torra. Após a ingestão, apenas um terço dos ACGs chegam à circulação sanguínea. O recobrimento entérico visa garantir a estabilidade e propriedade antioxidante dos ACGs. O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de recobrimento em leito fluidizado de partículas de café verde, com uma suspensão polimérica de liberação entérica, a fim de avaliar a influência da temperatura do ar e da vazão de suspensão sobre a umidade das partículas, diâmetro médio, ganho de camada e eficiência do processo. A vazão de suspensão apresentou maior influência sobre o ganho de camada e eficiência do processo, enquanto a temperatura do ar apresentou maior efeito sobre a umidade e diâmetro médio das partículas. A melhor condição de processo foi obtida no ensaio 4 ($T = 45\text{ °C}$ e $Q = 3,5\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$), visto que resultou em maior eficiência (80,4 %) e ganho de camada real (17,97 %), proporcionando partículas com umidade de 8,36 %, menor do que a umidade das partículas sem recobrimento (10,47 %).*

Introdução

A crescente preocupação com dieta e saúde tem impulsionado o desenvolvimento de produtos alimentícios mais saudáveis (Hygreeva *et al.*, 2014). Aliado à isso, os consumidores têm demonstrado cada vez mais interesse em alimentos que contêm ingredientes bioativos ou funcionais (especialmente os naturais) que sejam capazes de aumentar seu valor nutricional. Essas demandas têm norteado a indústria no desenvolvimento de novos produtos e na valorização ou adaptação dos já existentes (Hygreeva *et al.*, 2014). O café verde é a segunda *comodity* mais negociada no Brasil e seu consumo é, frequentemente, realizado a partir da infusão do grão torrado e moído (Tavares, 2002). Devido à sua exposição ao calor durante o processo de torra suas propriedades antioxidantes advindas, principalmente, dos ácidos clorogênicos, que compõem aproximadamente 12 % da sua composição *in natura* total, são perdidas (Farah *et al.*, 2005).

Uma das principais causas de alterações patológicas no organismo humano, está relacionada com o acúmulo excessivo de produtos de reação de oxigênio e nitrogênio em fluidos corporais, juntamente com os radicais livres. O aumento de radicais livres no organismo gera um estresse oxidativo, quebrando as ligações das moléculas de DNA e danificando o aparato genético das células que regulam seu crescimento, podendo resultar em células cancerígenas. A oxidação de lipoproteínas de baixa densidade depositadas nas paredes dos vasos sanguíneos pode causar doenças cardiovasculares e o estresse oxidativo prolongado, além de estar diretamente relacionada ao envelhecimento precoce (Yashin *et al.*, 2013).

Uma propriedade eficaz na redução do estresse oxidativo é a utilização de antioxidantes naturais que são capazes de reduzir ou até mesmo interromper as reações em cadeia causadas por radicais livres nas biomoléculas (Oroian e Escriche, 2015; Aguiar *et al.*, 2016). Os ácidos clorogênicos são antioxidantes naturais e estão presentes como principais compostos fenólicos não voláteis nos grãos de café verde (Alcantra, 2019).

Segundo Dellalibera, Lemaire e Lafay (2006) o consumo de ácidos clorogênicos contribui para a perda de peso, uma vez que 50 participantes, de idades entre 19 e 75 anos, apresentaram perda de aproximadamente $4,97 \pm 0,32\text{ kg}$ ao ingerir 200 mg de extrato de café verde por dia, durante um

período de 12 semanas. Além da perda de peso, alguns autores afirmam que o café verde possui propriedades anti-inflamatória (Moreira *et al.*, 2013), antioxidante (Yashin *et al.*, 2013), anticarcinogênica (Gaascht, Dicato e Diederich, 2015) e anti-hipertensiva (Iniesta e Al-Dujaili, 2014), principalmente devido ao seu alto teor de ácidos fenólicos, especialmente os ácidos clorogênicos. Ainda, o consumo de ácidos clorogênicos pode auxiliar no tratamento de diabetes tipo 2 e de alguns tipos de câncer, no controle de obesidade, na prevenção de doenças cardiovasculares e na redução do efeito oxidativo (Cho *et al.*, 2010; Ong *et al.*, 2013).

Dessa forma, uma alternativa de consumo, que aumenta a disponibilidade dos ácidos clorogênicos, tem sido as cápsulas produzidas a partir do pó de café verde. Entretanto, seu gosto amargo e baixa concentração deste que atinge o sistema sanguíneo tem reduzido os efeitos que esse consumo pode proporcionar, fazendo com que apenas um terço dos ácidos clorogênicos sejam absorvidos pelo trato gastrointestinal inferior e cheguem à circulação sanguínea para posterior metabolização no fígado (Cho *et al.*, 2010; Ong *et al.*, 2013).

Visando viabilizar a liberação entérica do ácido clorogênico presente nos grãos de café verde, uma alternativa é o processo de recobrimento. Esse processo é amplamente utilizado na indústria farmacêutica para realizar o recobrimento de partículas sólidas tais como *pellets*, pós e grânulos (Souza, 2013). Além de proteger o composto de interesse das condições adversas do ambiente e do armazenamento, o recobrimento também proporciona um produto com liberação controlada do princípio ativo, facilita o manuseio e a administração, mascara sabor e isola substâncias incompatíveis (Nitz, 2006).

O recobrimento em leito fluidizado é um processo dinâmico e complexo, que consiste da aspersão de uma suspensão de recobrimento sobre um leito de sólidos movimentado por uma corrente gasosa ascendente (Costa, 2003). A ocorrência simultânea do molhamento e secagem das partículas, que ocorre devido à rápida evaporação do solvente, permite a formação de uma camada uniforme da suspensão sobre a superfície das partículas. No que se refere a solução de recobrimento, o uso de uma suspensão polimérica a base de Eudragit® L100, classificado como um copolímero de ácido metacrílico (Remington, 2004) é interessante, visto que, esse polímero resulta em uma suspensão com alta flexibilidade, de fácil processamento, com tempo de preparação reduzido em relação à outras suspensões e com excelente adesão. Tais características, possibilitam um ganho de camada adequado para as partículas e uma melhora nas propriedades entéricas de liberação, por permitir a resistência das mesmas nos sucos gástricos e a liberação do princípio ativo nos fluidos intestinais (Silva, 2003).

O objetivo desse trabalho foi estudar o processo de recobrimento em leito fluidizado de partículas de café verde, com uma suspensão polimérica de liberação entérica, a fim de avaliar a influência da temperatura do ar de entrada e da vazão de suspensão sobre a umidade das partículas, diâmetro médio, eficiência do processo e ganho de camada real.

Material e Métodos

Materiais

As partículas utilizadas como matéria-prima no recobrimento foram grãos de café verde doados pela Cooperativa Regional dos Cafeicultores em Guaxupé LTDA-COOXUPE. Os grãos foram moídos e após classificados quanto a sua granulometria, utilizando um conjunto de peneiras com base vibratória (15 Hz por 15 minutos). Pela análise granulométrica observou-se a maioria das partículas (mais do que 50 %) ficaram retidas na peneira de abertura de 1,40 mm e, aproximadamente, 27 % ficaram retidas na peneira de 2,00 mm. Por esse motivo, aliado a boa movimentação obtida no interior do leito fluidizado (regime fluidodinâmico), as partículas dessas faixas granulométricas foram utilizadas nos ensaios. A faixa de tamanho das partículas e a quantidade de material utilizada no processo de recobrimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa granulométrica e quantidade das partículas de café verde.

Material	Faixa Granulométrica (mm)	Quantidade (g)
Grãos de café verde	-2,38+2,00	80,00
	-2,00+1,40	130,00

Preparo da suspensão de recobrimento

O processo de recobrimento foi realizado com um polímero de liberação entérica disponível no mercado, o Eudragit® L100 da Evonik. A suspensão polimérica foi preparada conforme recomendações do fabricante. Na Tabela está descrita a formulação da suspensão polimérica de recobrimento, a concentração de sólidos utilizada foi de 15 %.

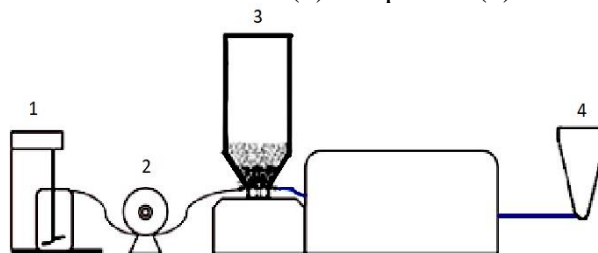
Tabela 2 – Base da formulação da suspensão polimérica.

Substância	Fabricante	Quantidade (%)
Eudragit® L100	Evonik	10
Hidróxido de amônio	Haloquímica	5
Trietil-Citrato	Jungbunzlauer	5
Talco puro	Synth	5
Água	-	75
Total	-	100

Sistema experimental

O recobrimento foi realizado em um leito fluidizado (Zelus, LF-50). Um compressor radial (IBRAM, CR6) fornece o ar de fluidização, que é aquecido por resistência elétrica controlada por regulador PID (Novus, N1100). A temperatura do ar de entrada e de saída é monitorada por termopar. Uma bomba peristáltica (IPC/IPC-N, Ismatec) foi utilizada para o transporte da suspensão polimérica até um bico aspersor do tipo duplo fluido. A atomização da suspensão foi realizada em modo concorrente ao fluxo do ar de fluidização (*bottom-spray*). Ar comprimido foi inserido no bico para atomização da suspensão polimérica na forma de gotículas. Detalhes do sistema experimental são descritos em Albanes *et al.* (2012) e em Custodio *et al.* (2020). Na Figura 1 é mostrada a representação do sistema experimental.

Figura 1 – Representação do sistema experimental: agitador mecânico (1); bomba peristáltica (2); leito fluidizado (3) e soprador (4).



Ensaio de recobrimento

O procedimento para a realização dos ensaios de recobrimento consistiu, primeiramente, da alimentação do leito com as partículas de café verde. Em seguida, foram acionados o soprador de ar, a resistência elétrica e a bomba peristáltica, iniciando-se a atomização da suspensão de recobrimento. Com base no conhecimento adquirido nos ensaios exploratórios foi proposto um planejamento fatorial completo, com triplicata no ponto central, totalizando 7 experimentos, para o estudo do processo de recobrimento. As variáveis de entrada estudadas foram a temperatura do ar de entrada (T , X_1) e a vazão de alimentação da suspensão (Q , X_2). As variáveis operacionais massa de material (0,210 g), pressão de atomização do ar ($1,5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$) e vazão do ar de fluidização ($180 \text{ N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$), foram mantidas em valores fixos. Como respostas foram analisadas a umidade das partículas, o

diâmetro médio, a eficiência do processo e o ganho de camada real. As variáveis de entrada, com seus respectivos valores reais e codificados, constam na Tabela . O tempo de processo foi determinado para um ganho de camada teórico de 20 %. O estudo do efeito das variáveis sobre as respostas foi realizado com auxílio do *software* Statistica® 8.0, considerando nível de confiança de 90 %.

Tabela 3 – Variáveis operacionais e níveis do planejamento fatorial.

Variáveis Reais	Níveis		
	-1	0	1
T (°C)	35	40	45
Q (g·min ⁻¹)	1,5	2,5	3,5

Para cada variável de resposta foi proposto um modelo matemático. 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.

Avaliação do processo de recobrimento

Os parâmetros avaliados no processo de recobrimento foram a eficiência do processo, a umidade das partículas recobertas e ganho de camada real. A avaliação do ganho de camada real (ϕ_{real}) corresponde à quantidade de massa de polímero que efetivamente aderiu ao grânulo após o recobrimento. O ganho de camada teórico (ϕ_{teo}) corresponde à quantidade de polímero calculado, desconsiderando as perdas, que deveria aderir ao grânulo após o processo de recobrimento (Souza, 2013). O memorial de cálculo para a obtenção dos parâmetros mencionados é apresentado nas Equações 1 a 6.

$$M_{ad\ real} = M_r \times (1 - U_r) - M_i \times (1 - U_i) \quad (1)$$

$$M_{susp} = Q_{susp} \times t_{rec} \quad (2)$$

$$M_{teo} = M_{susp} \times C_{pol} \quad (3)$$

$$\phi_{real} = \frac{M_{ad\ real}}{M_i(1-U_i)} \times 100 \quad (4)$$

$$\phi_{teo} = \frac{M_{teo}}{M_i(1-U_i)} \times 100 \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\phi_{real}}{\phi_{teo}} \times 100 \quad (6)$$

Em que M_i é a massa de partículas de café verde antes do recobrimento (g); U_i é a umidade das partículas antes do recobrimento (g água/g partícula úmida); M_r é a massa de partículas recobertas (g); U_r é a umidade das partículas recobertas (g água/g partícula úmida); $M_{ad\ real}$ é a massa de polímero real aderida (g); M_{susp} é a massa de suspensão aplicada (g); Q_{susp} é a vazão mássica da suspensão de recobrimento (g·min⁻¹); t_{rec} é o tempo de recobrimento (min); M_{teo} é a massa de polímero teórica aplicada (g); c_{pol} é a concentração de polímero na suspensão de recobrimento (g·g⁻¹); ϕ_{real} é o ganho de massa real no recobrimento (%); ϕ_{teo} é o ganho de massa teórico no recobrimento (%) e η é a eficiência do processo de recobrimento (%).

Umidade

A umidade das partículas (U) foi determinada com o auxílio de um analisador de umidade com aquecimento por lâmpada de halogênio (Shimadzu Corporation, MOC63u). A calibração desse analisador foi realizada com base no método de referência para determinação de umidade (AOAC, 1995), realizado em estufa à 105 °C até massa constante. O analisador de umidade realiza a secagem da amostra e mede a perda de massa sob aquecimento com o decorrer do tempo até uma variação mínima de massa entre os tempos de análise. Para a determinação da umidade das partículas não recobertas utilizou-se o método *Coffee beans (roasted)* com os seguintes parâmetros: 3 g de amostra, temperatura de 140 °C e variação de massa de 0,05 %. Para as partículas recobertas, utilizou-se um método alternativo, não descrito pelo fabricante, baseado nos dados obtidos pela estufa. Nesse método foi utilizado 5 g de amostra, temperatura de 130 °C e variação de massa de 0,05 %.

Tamanho de partícula

As partículas de café verde antes e após o recobrimento foram caracterizadas quanto a distribuição de tamanho das partículas e diâmetro médio de *Sauter*, calculado pela Equação 7. Para isso, sua granulometria foi determinada com o auxílio de um conjunto de peneiras de telas de aço da série *Tyler*, as quais foram submetidas a uma vibração na frequência de 15 Hz por 15 minutos, utilizando um agitador de peneiras (A bronzinox, ABMA 0800, São Paulo, Brasil).

$$dp_s = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (7)$$

Resultados e Discussão

Os resultados de umidade das partículas recobertas, diâmetro médio, ganho de camada real e teórico e eficiência do processo são apresentados na Tabela . Observa-se que a umidade das partículas recobertas variou de 6,19 % a 16,10 % (b.u.), o diâmetro médio variou entre 1,86 mm e 2,03 mm, o ganho de camada real variou entre 13,61 % e 17,97 %, o ganho de camada teórico variou entre 21,32 % e 22,34 % e a eficiência variou de 63,9 % a 80,4 %. 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.

Tabela 4 - Matriz do planejamento experimental e resultados das respostas.

Ensaio	T (°C)	Q (g·min ⁻¹)	U (%)	dp _s (mm)	φ _{real} (%)	φ _{teo} (%)	η (%)
PSR	-	-	10,47	1,86	-	-	-
1	35	1,5	9,32	1,96	15,01	21,54	69,7
2	35	3,5	16,10	2,03	15,15	22,13	68,5
3	45	1,5	6,19	1,86	13,61	21,32	63,9
4	45	3,5	8,96	1,87	17,97	22,34	80,4
5	40	2,5	8,11	1,94	14,43	21,83	65,3
6	40	2,5	9,76	2,01	15,13	21,83	69,3
7	40	2,5	8,39	1,94	15,14	21,91	69,1

PSR – Partículas sem recobrir

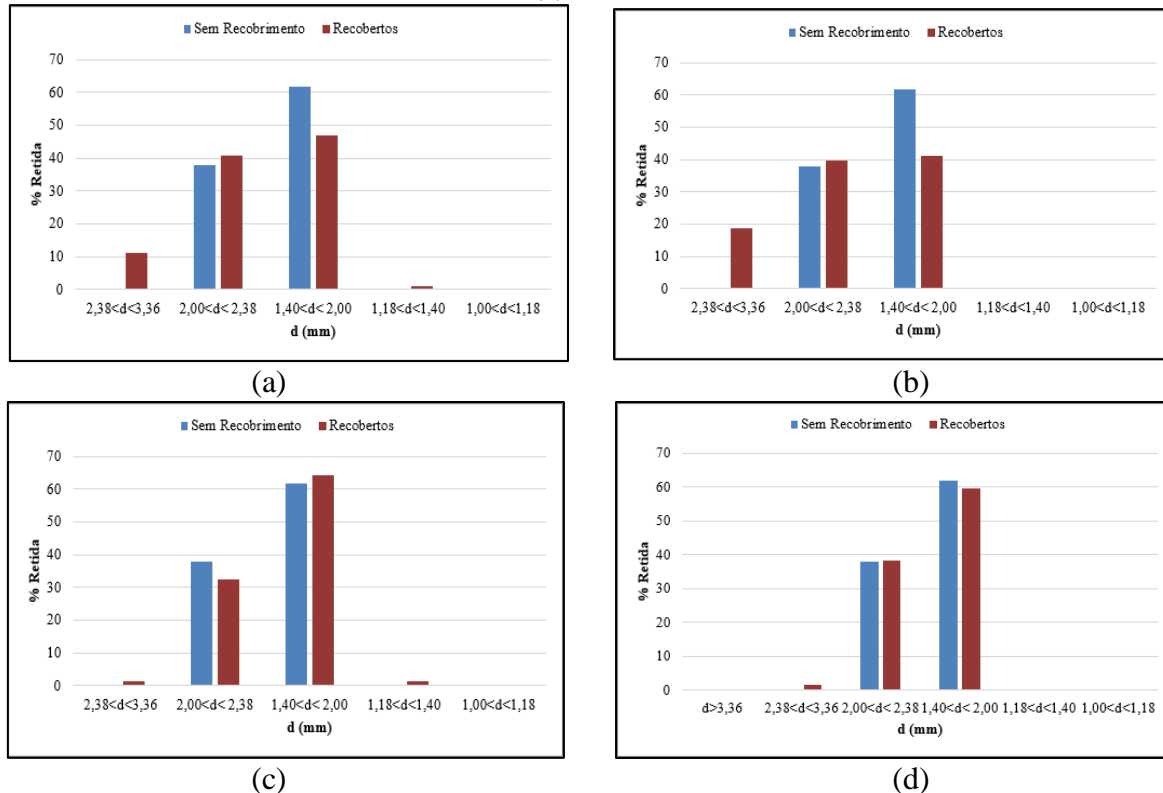
Nos ensaios executados com vazão de suspensão no nível inferior (Q = 1,5 g·min⁻¹, ensaios 1 e 3), percebeu-se o depósito de parte dos sólidos da suspensão nas paredes da mangueira. Isso pode ter ocorrido, pois a suspensão polimérica necessita ficar em constante agitação e, no interior da mangueira, isso não é possível. Portanto, a condição de vazão no nível inferior aliada a essa necessidade da suspensão, fez com que parte da mesma ficasse acumulada nas paredes da mangueira, possivelmente afetando a quantidade de suspensão que entrava no leito e sua concentração, pois, eventualmente, a concentração de sólidos que entrou no leito foi menor do que a esperada.

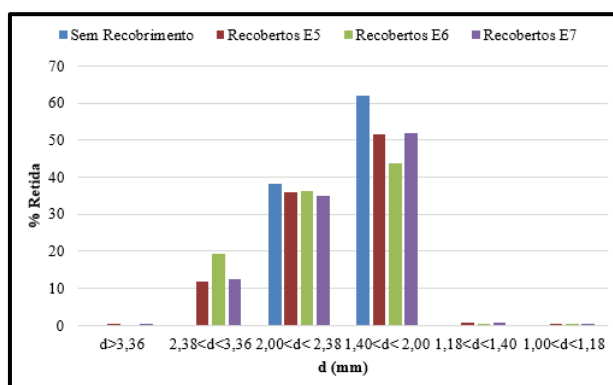
Ainda, pelos resultados da Tabela 4, verifica-se que o uso de alta temperatura aliada à baixa vazão ($T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q = 1,5\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, ensaio 3), resultaram em menor umidade e diâmetro médio das partículas, bem como em menor eficiência (63,9%) e ganho de camada real (13,61%). Esse resultado pode ser atribuído ao uso de alta temperatura do ar aliada à baixa vazão de suspensão, que proporcionam menor umidade no interior do leito aumentando a taxa de secagem. Com isso, a secagem da suspensão pode ter ocorrido antes de entrar em contato com as partículas. Como resultado ocorre o arraste do polímero para a parte superior do leito, o que foi observado visualmente. Tais condições, dificultam a formação de uma camada uniforme da suspensão sobre a superfície das partículas, implicando em menor eficiência, ganho de camada, diâmetro médio e umidade das partículas. Além disso, esse resultado pode também estar relacionado com a perda de suspensão nas paredes da mangueira, de modo que a quantidade que entrou no leito foi menor do que a esperada, resultando nos menores valores das respostas estudadas.

Já o uso de alta temperatura aliada à alta vazão ($T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q = 3,5\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, ensaio 4) resultou em maior eficiência e ganho de camada real. Altas vazões de ligante favorecem o umedecimento das partículas, já altas temperaturas favorecem a secagem. A combinação dessas variáveis no nível superior proporcionou um maior equilíbrio entre umedecimento e secagem das partículas, levando a uma maior eficiência do processo e ganho de camada real. Souza *et al.* (2014) estudaram o recobrimento de *pellets* de nifedipino utilizando suspensão polimérica de Opadry® e Opadry® II. Os autores obtiveram eficiência de processo maior que a obtida no presente estudo (98,20%), para *pellets* com granulometrias semelhantes (0,71 mm – 1,40 mm), entretanto, o mesmo comportamento de resultados em relação ao uso da temperatura do ar e da vazão de suspensão no nível superior.

Pelos gráficos da Figura 2 é possível observar a distribuição granulométrica das partículas antes e após o recobrimento para cada condição estudada.

Figura 2 – Gráficos de distribuição granulométrica para: (a) ensaio 1, (b) ensaio 2, (c) ensaio 3, (d) ensaio 4, (e) ensaios 5, 6 e 7





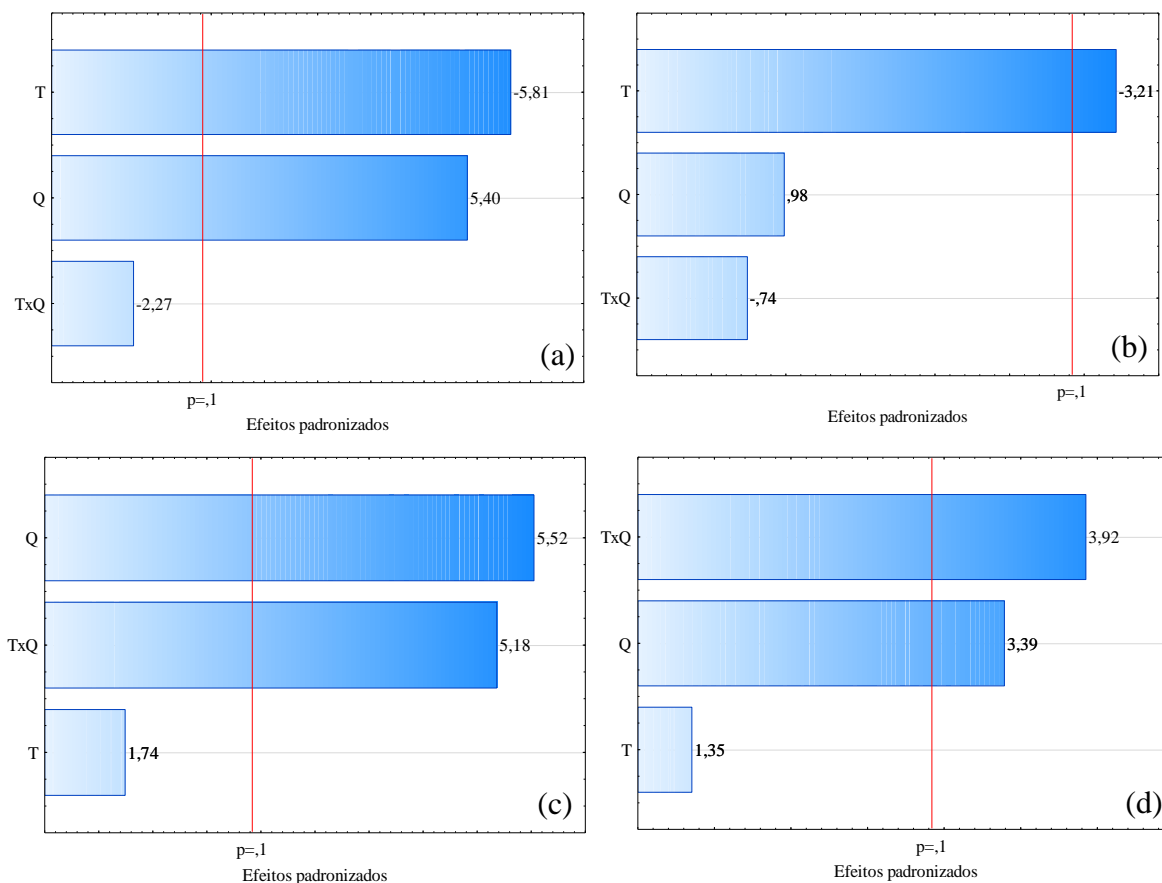
(e)

Pelos resultados de distribuição granulométrica, nota-se que houve um aumento no tamanho das partículas, o que é representado pelo surgimento de partículas com tamanho maior que 2,38 mm, o que foi mais evidenciado com o uso de maior vazão. O diâmetro médio da matéria-prima apresentou um aumento de até de 9,14 %. O ensaio 2 proporcionou partículas com maior diâmetro médio (2,03 mm), apesar de não proporcionar maior eficiência e ganho de camada real. Esse resultado pode ser atribuído ao uso de temperatura e vazão no nível inferior, o que possivelmente proporcionou uma menor taxa de secagem da suspensão, em relação aos demais ensaios, permitindo um contato intenso entre a suspensão e as partículas, levando a alta molhabilidade (Santana, 2016), o que pode ter promovido a união de algumas partículas (aglomerados), resultando em maior diâmetro médio.

Análise estatística

Os gráficos de Pareto para as respostas estudadas são mostrados na Figura 3, nos quais os efeitos estatisticamente significativos se localizam à direita do limiar de significância ($p < 0,10$).

Figura 3 – Gráficos de Pareto para: (a) U, (b) dp_s , (c) ϕ_{real} e (d) η .



Pela análise estatística dos resultados foi possível determinar a significância dos efeitos das variáveis sobre as respostas. Pela Figura 3 (a) verifica-se que a temperatura do ar e a vazão de suspensão apresentaram efeitos estatisticamente significativos sobre a umidade das partículas. O efeito positivo da vazão indica que o aumento dessa variável resulta em maior umidade. Já o efeito negativo da temperatura mostra que o aumento dessa variável proporciona partículas com menor umidade. Para o diâmetro médio das partículas, Figura 3 (b), apenas o efeito da temperatura do ar foi estatisticamente significativo, sendo esse negativo, indicando que o aumento da temperatura resulta em menor diâmetro. No que se refere ao ganho de camada real e a eficiência, Figura 3 (c) e Figura 3 (d), respectivamente, a temperatura do ar e a interação entre temperatura e vazão apresentaram efeitos significativos. Para essas respostas, o efeito da vazão foi positivo, o que mostra que o aumento da vazão proporciona maior ganho de camada e maior eficiência, para alta temperatura do ar (45 °C), conforme pode ser observado pelos resultados da Tabela 4, mostrando a significância da interação das variáveis.

Na Tabela 5 constam os valores calculados e tabelados do parâmetro F de Fisher. Para a umidade, ganho de camada real e eficiência, 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 (Equações 8, 9 e 10) 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 91,6 %, 92,4 % e 86,5 % para U, φ_{real} e η , respectivamente. Para o diâmetro médio o R^2 foi de 78,9 % e o modelo não foi significativo nem preditivo.

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 (U)	10,93	5,39	4,24	8,53	0,916
Ganho de camada real (φ_{real})	12,19	5,39	2,96	8,53	0,924
Eficiência (η)	6,38	5,39	2,51	8,53	0,865

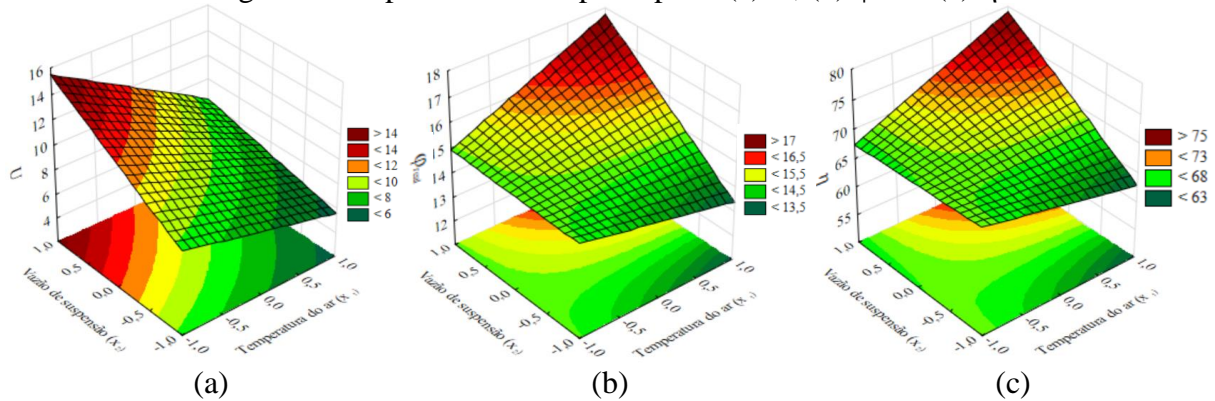
$$U = 9,54 - 2,57x_1 + 2,39x_2 - 1,00x_1x_2 \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{real}} = 15,20 + 0,35x_1 + 1,12x_2 + 1,05x_1x_2 \quad (9)$$

$$\eta = 69,46 + 1,52x_1 + 3,82x_2 + 4,42x_1x_2 \quad (10)$$

Na Figura 3 são apresentadas as superfícies obtidas para as respostas que geraram modelos significativos e preditivos. Observa-se pelas Figuras 3 (b) e 3 (c) que maiores vazões de suspensão aliadas a maiores temperaturas do ar favorecem o ganho de camada e a eficiência do processo. Altas vazões de suspensão aliadas a baixas temperaturas resultam em partículas mais úmidas, enquanto baixas vazões e altas temperaturas proporcionam partículas com menor umidade, conforme pode ser visto na Figura 3 (a).

Figura 3 – Superfícies de resposta para: (a) U, (b) ϕ_{real} e (c) η .



Conclusões

O processo de recobrimento de partículas de café verde em leito fluidizado utilizando suspensão polimérica de liberação entérica foi viável, resultando em valores de eficiência acima de 60 % para todas as condições estudadas. A análise estatística dos resultados mostrou que a vazão de suspensão foi a variável que apresentou maior influência sobre o ganho de camada e eficiência do processo, de modo que o aumento dessa variável resultou em maior eficiência e ganho de camada, bem como em partículas com maior umidade. Já, a temperatura do ar, apresentou maior efeito sobre a umidade e diâmetro médio das partículas, sendo que o aumento dessa variável proporcionou menor umidade e menor diâmetro médio. Dentro do domínio experimental estudado, a melhor condição de processo foi obtida no ensaio 4 ($T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q = 3,5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$), visto que resultou em maior eficiência (80,4 %) e ganho de camada real (17,97%), proporcionando partículas com umidade de 8,36 %, menor do que a umidade das partículas sem recobrimento (10,47 %).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de IC-PIBIC concedida. Os autores também agradecem ao professor Guilherme José de Castilho (FEQ/UNICAMP) e a aluna de Doutorado Maria Paula Maciel Pinto (FEQ/UNICAMP) pela parceria no desenvolvimento do trabalho.

Referências Bibliográficas

- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of AOAC International. (16 ed.). Washington, 1995.
- Aguiar, J.; Estevinho, B.N.; Santos, L. (2016) Microencapsulation of natural antioxidants for food application – The specific case of coffee antioxidants – A review. *Trends in Food Science & Technology*, **58**, 21-39.
- Albarez, R. (2012) Recobrimento gastrorresistente de pellets de diclofenaco de sódio em leito fluidizado tipo Wurster. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.
- Alcantra, G.M.R.N. (2019) Comparação das espécies químicas não voláteis entre cafés especiais e tradicionais. Universidade de São Paulo. Piracicaba. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos.
- Cho, A.S.; Jeon, S.M.; Kim, M.J.; Yeo, J.; Seo, K.I.; Choi, M.S.; Lee, M.K. (2010) Chlorogenic acid exhibits anti-obesity property and improves lipid metabolism in high-fat diet-induced-obese mice. *Food and Chemical Toxicology*, **48**, 937-943.
- Costa, M.A. (2003) Peletização de Sementes de Brócolos em Leito de Jorro Cônico. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.

- Custodio, G.R.; Souza, L.F.G; Nitz, M.; Andreola, K. (2020) A protein powder agglomeration process using açai pulp as the binder: An analysis of the process parameters. *Advanced Powder Technology*, **31**, 3551-3561.
- Dellalibera, O.; Lemaire, B.; Lafay, S. (2006) Svetol®, green coffee extract, induces weight loss and increases the lean to fat mass ratio in volunteers with overweight problem. *Phytoterapy*, **4**, 194-197.
- Farah, A.; Paulis, T.; Trugo, C. L.; Martin, R.P. (2005) Effect of roasting on the formation of chlorogenic acid lactones in coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **53**, 1505-1513.
- Gaascht, F.; Dicato, M.; Diederich, M. (2015) Coffee provides a natural multitarget pharmacopeia against the hallmarks of cancer. *Genes and Nutrition*, **10**, 1–17.
- Hygreeva, D.; Pandey, C.M.; Radhakrishna, K. (2014) Potential applications of plant based derivatives as fat replacers, antioxidants and antimicrobials in fresh and processed meat products. *Meat Science*, **98**, 47-57.
- Moreira, M.E.C; Pereira, R.G.F.A.; Dias, D.F.; Gontijo, V.S.; Vilela, F.C., de Moraes, G.O.I.; Giustini-Paiva, A; Santos, M.H. (2013). Anti-inflammatory effect of aqueous extracts of roasted and green *Coffea arabica* L. *Journal of Functional Foods*, **5**, 466-474.
- Nitz, N. (2006) Fluidinâmica, secagem e recobrimento em leite pulso-fluidizado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.
- Ong, K.W.; Hsu, A.; Tan, B.K.H. (2013) Anti-diabetic and anti-lipidemic effects of chlorogenic acid are mediated by ampk activation. *Biochemical Pharmacology*, **85**, 1341-1351.
- Oroian, M.; Escriche, I. (2015) Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Research International*, **74**, 10-36.
- Remington, J. P. (2004) A ciência e a prática da farmácia. Guanabara Koogan, **20**, 2208, Rio de Janeiro.
- Iniesta, R. R.; Al-Dujaili, E. (2014) Consumption of green coffee reduces blood pressure and body composition by influencing 11β-HSD1 enzyme activity in healthy individuals: A pilot crossover study using green and black coffee. *BioMed Research International*, **2014**, 1-10.
- Santana, E. B. (2016) Recobrimento de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) com suspensão biopolimérica em leite de jorro. Universidade Federal do Pará. Belém. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais.
- Silva, S.O. (2003) Desenvolvimento do processo de recobrimento e secagem de microgrânulos em leite fluidizado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.
- Souza, G.F.L. (2013) Desenvolvimento e recobrimento polimérico de microgrânulos contendo nifedipino visando a um perfil de liberação controlada. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Química.
- Souza, L.F.G.; Nitz, M.; Taranto, O. P. (2014). Film coating of nifedipine extended release pellets in a fluid bed coater with a Wurster insert. *BioMed Research International*, **2014**, 1-12.
- Tavares, A.L.E. (2002) A questão do café commodity e sua precificação: o “C Market” e a classificação, Remuneração, e qualidade do café. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP.
- Yashin, A.; Yashin, Y.; Wang, J. Y.; Nemzer, B. (2013) Antioxidant and antiradical activity of coffee. *Antioxidants*, **2**, 230-245.