

FLUIDODINÂMICA DO BAGAÇO DE LARANJA PRÉ-TRATADO EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

GUILHERME H. A. PINTO^{1*}, FÁBIO BENTES FREIRE¹, JOSÉ T. FREIRE¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Departamento de Engenharia Química
*e-mail: guilherme.pinto@estudante.ufscar.br

RESUMO - A secagem do bagaço de laranja faz-se necessária para sua destinação, seja na produção de ração animal ou na geração de energia. Entretanto, devido à grande aderência, essa biomassa possui uma baixa mobilidade, sendo um problema a ser contornado para viabilizar sua aplicação. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a fluidodinâmica do bagaço de laranja, submetido a diferentes pré-tratamentos, em leito de jorro convencional. Foi observado que o bagaço misturado a 1% de CaO e prensado já apresentou mobilidade, sendo observada a formação de um regime próximo ao de jorro. O pré-tratamento completo reduziu a umidade inicial em 31,7%. Nas condições avaliadas, foi observada a formação de um regime de jorro com alturas de leito estático de 14,06 cm a 21,12 cm, sendo observado o aumento da velocidade de mínimo jorro de 8,69 para 11,11 m/s e o aumento da queda de pressão máxima de 0,916 para 1,095 kPa com o aumento da altura do leito. Também foi observada a perda de parte do leito com o arraste de partículas, até 11,65% de sua massa inicial. Embora o pré-tratamento tenha auxiliado a formação do jorro, seriam necessárias estratégias adicionais para reduzir a demanda de ar e estabilizar o processo.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de suco de laranja do mundo, responsável por 50% de toda a produção mundial e aproximadamente 98% do que é produzido é destinado ao mercado externo. A cultura da laranja é amplamente difundida, havendo plantações de laranja em todos os estados brasileiros (*Produção de Laranjas: Brasil é Líder Nesse Negócio*, 2022). O bagaço é o principal subproduto da indústria da laranja correspondendo a aproximadamente 50% da massa inicial da fruta, sendo composto pelo epicarpo, mesocarpo, fiapos e sementes (TetraPak, 2017).

O bagaço de laranja é uma biomassa lignocelulósica normalmente utilizada na alimentação de humanos e animais devido a sua composição, sendo rico em fibras, proteínas e vitaminas (Acharjee et al., 2021). O principal destino do bagaço de laranja é a sua secagem e

a sua comercialização como ração animal. A secagem prévia de biomassas também é necessária para a reduzir os custos com transporte e armazenamento, além de prolongar o seu tempo de prateleira (Afrin et al., 2022). Ademais, biomassas aplicadas em combustão também devem ter sua umidade reduzida, não somente para facilitar sua ignição, como para aumentar o seu poder calorífico (Cordeiro et al., 2013).

Dentre os possíveis secadores, o secador do tipo leito de jorro apresenta características positivas, como o bom contato entre o sólido a ser seco e o gás, o alto grau de mistura e elevadas taxas de transferência de calor e massa. No entanto, secadores do tipo leito de jorro apresentam uma alta demanda energética, uma vez que a vazão de ar necessária para romper a resistência do leito e movimentar as partículas é consideravelmente elevada (Freire et al., 2012).

A secagem de biomassas lignocelulósicas, assim como a operação envolvendo outros materiais de origem biológica, apresenta dificuldades a serem contornadas. Em leito de jorro convencional, a presença de materiais com distribuição granulométrica irregular provoca o fenômeno de segregação, que é o acúmulo de material em diferentes regiões do leito (Du et al., 2015; Santos et al., 2015). Ademais, a presença de açúcares, especialmente em frutas, aumenta as forças de interação superficial, provocando a formação de aglomerados e o acúmulo de material sobre superfícies metálicas (Ochoa-Martinez et al., 1993; Stroem et al., 2009). Freire et al. (2017) avaliaram a secagem do bagaço de laranja em leito de jorro, observando uma grande dificuldade de promover a movimentação das partículas de forma estável. Foi necessária a modificação estrutural do leito de jorro e mistura de biomassa úmida e biomassa previamente seca para alcançar os seus objetivos (Freire et al., 2017).

De acordo com este cenário, o presente trabalho teve como objetivo analisar a fluidodinâmica do bagaço de laranja em leito de jorro convencional. Para tanto, foram propostos três pré-tratamentos diferentes para o bagaço de laranja para reduzir suas dimensões e umidade. O bagaço de laranja foi alimentado ao leito de jorro com configuração cônica, variando a altura de leito estático e observando se houve ou não a formação de um regime de jorro. Os principais parâmetros fluidodinâmicos, a velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão máxima, foram determinados com o auxílio da curva característica. Também foi analisado o arraste de partículas pela corrente gasosa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Pré-Tratamento do Bagaço de Laranja

O bagaço de laranja foi obtido a partir da extração de suco em um extrator de frutas Mondial TURBO 250W, sendo composto pela sua casca, fiapos e sementes. O bagaço era mantido em um recipiente inerte de plástico sob constante refrigeração.

O bagaço era então submetido a três pré-tratamentos diferentes. No primeiro pré-tratamento, o bagaço era triturado em um

liquidificador industrial Metalurgica 7000 Light para reduzir suas dimensões. Para tanto, o bagaço original foi triturado em porções de 250 g no liquidificador por 1 min. Posteriormente do bagaço já triturado, 400 g eram submetidos novamente ao processamento no liquidificador por mais 1 min. Ao bagaço de laranja triturado deu-se o nome “bagaço *in natura*”. No segundo pré-tratamento, o bagaço de laranja era triturado da forma semelhante ao primeiro pré-tratamento, porém, era submetido a uma etapa posterior de prensagem. No terceiro pré-tratamento, o bagaço era triturado em liquidificado e submetido a uma prensagem como no segundo pré-tratamento, porém, antes da etapa de prensagem o bagaço era misturado com cal virgem, com uma massa equivalente a 1% da massa total.

Na etapa de prensagem foi utilizada uma célula constituída por um cilindro de aço galvanizado com 17,6 cm de diâmetro e 14 cm de altura soldado a uma peneira de aço inoxidável em uma de suas faces. Para permitir a passagem de água foram feitos diversos furos com 3 mm de diâmetro na lateral do cilindro e foram soldadas hastes de aço em sua base para evitar o acúmulo de água e o seu retorno quando cessasse a compressão mecânica. Aproximadamente 1 kg de bagaço era adicionado à célula de prensagem envolto por um tecido de algodão, que funcionava como meio filtrante e evitava a perda de biomassa junto com a água. Com o bagaço dentro da célula, era adicionado um pistão de madeira com uma base de acrílico com 1 cm de espessura. O sistema era então submetido a uma força de compressão de 3,8 tonf, equivalente a uma pressão de aproximadamente 1,53 kPa, por 1 min.

Caracterização do Bagaço de Laranja

Umidade do bagaço: A umidade da biomassa foi determinada através do método gravimétrico, sendo o material submetido a uma secagem em estufa a 80 °C por 24 horas.

Distribuição granulométrica: A distribuição granulométrica do bagaço de laranja foi feita pelo seu peneiramento utilizando peneiras de 3,5, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 14, 16, 20, 25 e 30 mesh, além do fundo sem aberturas. Para evitar a aderência da biomassa

nas peneiras e os consequentes desvios nos resultados, o bagaço foi previamente seco em estufa a 80 °C por 24 horas. 200 g do bagaço seco foram submetidos ao peneiramento com agitação por 5 min, sendo os ensaios realizados em triplicata. O diâmetro médio de Sauter foi calculado pela Equação 1, onde x_i corresponde à fração mássica de bagaço retido na i -ésima peneira e d_{pi} corresponde à abertura da peneira correspondente.

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (1)$$

Fluidodinâmica em Leito de Jorro

Unidade experimental: A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da unidade experimental utilizada nos ensaios de fluidodinâmica do bagaço de laranja em leito de jorro. O fornecimento de ar ao sistema era feito por um soprador IBRAM com potência de 7,5 HP com uma vazão máxima de 4 m³/min. O ajuste da vazão de ar direcionada para câmara do leito de jorro era feito manualmente por um sistema de válvulas *by-pass*. O sistema era composto por duas válvulas do tipo gaveta de duas polegadas. O ar então passava por um tubo Venturi para medir a vazão direcionada ao leito de jorro e por um sistema de aquecimento composto por resistências elétricas. A temperatura do ar era controlada com o auxílio de um termopar posicionado na base do leito e um controlador Flyever FE50RPN. A diferença de pressão no tubo Venturi e entre a entrada e a saída da câmara principal era medida por transdutores de pressão Auto Tran 860 com faixa de 0 a 5 psi. Os sinais elétricos dos transdutores, juntamente com os sinais dos termopares posicionados ao longo do sistema, eram enviados a um condicionador de sinais Lynx modelo MCS 1000 V.3 e enviados a um computador, onde o usuário acessava as informações pelo software LabView 6.1.

A câmara principal era composta por uma coluna cilíndrica com 87 cm de altura e 30 cm de diâmetro posicionado entre dois cones, tendo a base uma inclinação de 45°, um diâmetro inferior de duas polegadas, diâmetro superior de 30 cm e 27 cm de altura. Na coluna cilíndrica haviam dois visores de acrílico com 7,5 cm de diâmetro para visualizar o interior do equipamento.

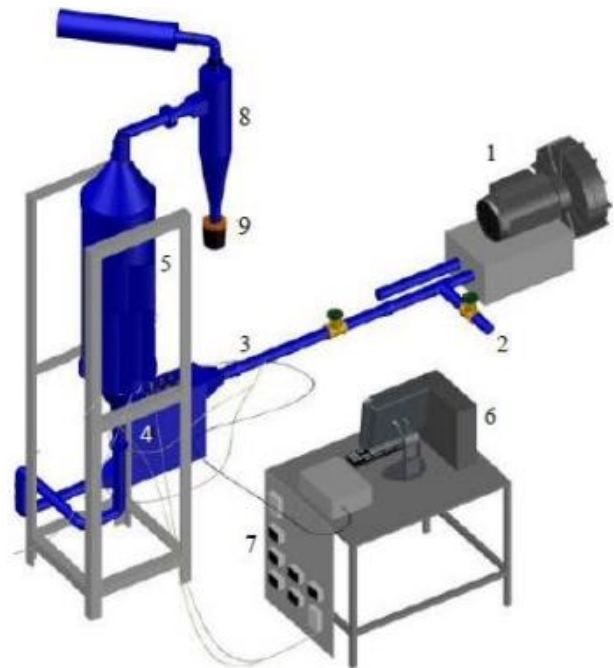


Figura 1: Representação esquemática do leito de jorro e seus principais elementos: (1) soprador, (2) válvulas *by-pass*, (3) tubo de Venturi, (4) caixa de resistências, (5) câmara principal, (6) computador, (7) transdutores, (8) ciclone e (9) coletor de finos.

Procedimentos experimentais: Antes de realizar os ensaios da fluidodinâmica em leito de jorro foi necessário determinar a queda de pressão do equipamento vazio em função da velocidade do ar, denominada “branco”. Para tanto, a vazão foi aumentada a partir do 0 até vazão máxima fornecida pelo soprador. A queda de pressão no branco, ΔP_{branco} , foi ajustada pela Equação 2, onde os coeficientes a e b foram determinados experimentalmente.

$$\Delta P_{branco} = au^b \quad (2)$$

Nos ensaios de fluidodinâmica, a biomassa era alimentada no sistema e o ar era direcionado ao leito até que fosse observada a sua expansão, sendo o fornecimento imediatamente interrompido. O procedimento para a obtenção das curvas características foi dividido em duas etapas, uma a velocidade crescente e outra a velocidade decrescente. Na etapa a velocidade crescente, a velocidade era aumentada a partir do zero até o ponto em que era observado o rompimento da resistência mecânica e a formação do canal do jorro. Depois a velocidade do ar foi mantida constante

por 5 minutos para coletar as partículas arrastadas pela corrente gasosa. Por fim, na etapa a velocidade decrescente a velocidade do ar era reduzida até zero. A queda de pressão no leito foi calculada pela diferença entre a queda de pressão total e a queda de pressão no leito vazio, como descrito pela Equação 3.

$$\Delta P_{leito} = \Delta P_{total} - \Delta P_{branco} \quad (3)$$

O bagaço submetido aos três pré-tratamentos foi avaliado com uma altura de leito estático, H, igual a 14,06 cm, pouco acima da metade da altura total da base cônica. Através das curvas características foram obtidos os principais parâmetros

fluidodinâmicos, a velocidade de mínimo jorro, u_{mj} , e a queda de pressão máxima $\Delta P_{m\acute{a}x}$. Caso fosse observado o estabelecimento de um regime de jorro, havia um acréscimo na altura do leito e os procedimentos eram repetidos até a operação alcançar o seu limite.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades do Bagaço Pré-Tratado

Umidade do bagaço: Os dados para a umidade do bagaço de laranja submetidos aos três pré-tratamentos distintos, bagaço *in natura*, o bagaço parcialmente tratado e o bagaço completamente tratado, se encontram representados pela Tabela 1.

Tabela 1: Umidade do bagaço de laranja submetido aos diferentes pré-tratamentos.

Propriedade	Bagaço <i>in natura</i>	Bagaço prensado	Bagaço – Prensado+1% CaO
Umidade b.s (kg água/kg seco)	3,710±0,101	3,489±0,027	2,533±0,075
Umidade b.u (kg água/kg total)	0,788±0,004	0,777±0,001	0,717±0,006

Pôde-se observar que nas condições em que o bagaço de laranja foi submetido à prensagem a sua umidade foi menor em comparação ao bagaço original. No entanto, destaca-se que a mistura prévia com 1% de cal virgem foi mais eficiente, havendo a redução de 31,7% na umidade, de 3,710 para 2,533 kg, enquanto a prensagem isolada reduziu a umidade em 5,9%.

A adição de cal virgem em um meio com disponibilidade de água liberaria cátions Ca^{2+} que, por sua vez, possuem forte afinidade com grupos carboxila, presentes nos monômeros de pectina e hemicelulose. A pectina seria responsável pela retenção de água na forma de um gel e sua reação com os cátions Ca^{2+} tornaria livres estas moléculas de água sem a ocorrência de alterações físicas significativas na biomassa (Barbosa et al., 2020).

Granulometria do bagaço triturado: A Tabela 2 apresenta os dados para a fração mássica de bagaço triturado retido em cada uma das peneiras selecionadas. Pôde-se observar uma não-uniformidade na geometria do bagaço triturado no liquidificador, havendo desde partículas retidas na peneira com abertura de 5,66 mm a partículas que atravessaram

aberturas de 0,595 mm e foram retidas somente no fundo. Entretanto, a maior parte das partículas apresentaram dimensões grosseiras, com 83,37% do total apresentando dimensões superiores a 2,03 mm e diâmetro médio de Sauter igual a 2,641 mm. A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica do bagaço triturado.

Tabela 2: Fração mássica do bagaço de laranja retida por peneira.

Abertura (mesh)	Abertura (mm)	Fração mássica
3,5	5,66	0,154±0,019
4	4,76	0,092±0,005
5	4,00	0,112±0,009
6	3,36	0,108±0,009
7	2,83	0,133±0,011
8	2,38	0,101±0,016
12	1,68	0,155±0,010
14	1,41	0,054±0,001
16	1,19	0,030±0,001
20	0,841	0,036±0,010
25	0,707	0,008±0,002
30	0,595	0,007±0,002
Fundo	0	0,011±0,004

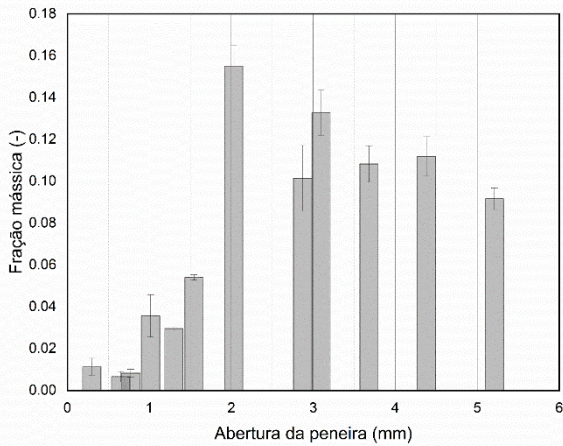


Figura 2: Distribuição granulométrica do bagaço de laranja triturado.

Fluidodinâmica em Leito de Jorro

A Figura 3 apresenta a queda de pressão no “branco”, equipamento sem a presença de partículas sendo expressa pela Equação 4, onde os coeficientes foram determinados numericamente.

$$\Delta P_{branco} = 0,0566u^{1,929} \quad (4)$$

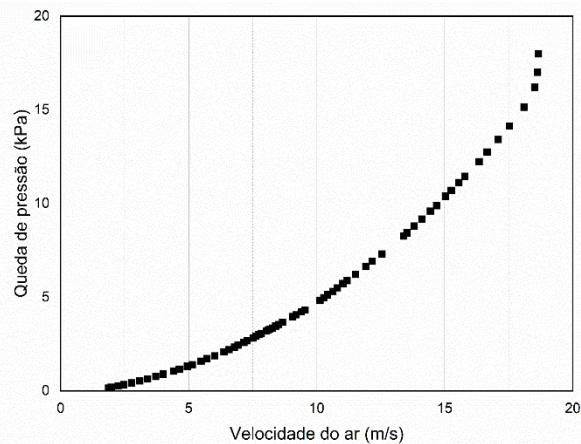


Figura 3: Queda de pressão no sistema vazio em função da velocidade do ar.

Inicialmente, foi adicionado ao sistema um volume de 1,8 l de bagaço submetido aos três pré-tratamentos, o que equivaleria a uma altura de leito estático H de aproximadamente 14,06 cm. Através dos visores presentes no cilindro, não foi possível observar a movimentação intensa do bagaço de laranja, condição que caracteriza o estabelecimento de um regime de jorro, quando o bagaço não fora submetido ao pré-tratamento completo, mesmo com o direcionamento total da vazão de ar disponível. Ao desmontar o equipamento para

remover a biomassa foi observada a formação de uma região “vazia” abaixo do leito, indicando que o bagaço *in natura* e o bagaço parcialmente tratado foram “empurrados” pela corrente gasosa como um pistão. Estes resultados estão de acordo com os observados por Freire et al. (2017), que destacaram a necessidade de adotar estratégias diferentes para promover o movimento do bagaço de laranja em leito de jorro convencional. Para conseguir jorrar os autores usaram a estratégia de misturar bagaço úmido a bagaço previamente seco em diferentes proporções (Freire et al., 2017).

A Figura 4 apresenta a curva característica de jorro para altura de leito estático, H , igual a 14,06 cm de bagaço completamente tratado. Pôde-se observar que nestas condições foi estabelecido o regime de jorro. No entanto, na velocidade em que ocorre o rompimento da resistência mecânica exercida pelo leito houve o arraste de partículas finas pela corrente gasosa que foram coletadas no ciclone, que correspondiam a 2,05% da massa inicial do leito. Pela curva característica foram identificados os principais parâmetros fluidodinâmicos, a velocidade de mínimo jorro $u_{mj}=8,69$ m/s e a queda de pressão máxima $\Delta P_{m\acute{a}x}=0,916$ kPa.

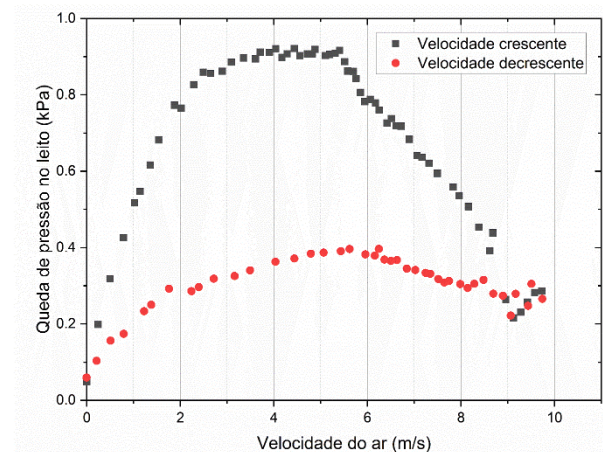


Figura 4: Curva característica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro com $H=14,06$ cm.

Deste modo, foi avaliada a fluidodinâmica do bagaço de laranja completamente tratado em outras quatro alturas de leito estático superiores a 14,06 cm, sendo elas 16,69, 18,33, 21,12 e 23,91 cm. O bagaço *in natura* e o bagaço parcialmente tratado não

foram avaliados em maiores alturas de leito estático. $H=23,91$ cm foi considerado como o limite operacional para o bagaço completamente tratado no aparato experimental utilizado, uma vez que o direcionamento de toda a vazão de ar não foi capaz de promover a movimentação das partículas.

Nas condições avaliadas foram observados fenômenos relacionados à instabilidade do regime de jorro, porém, nas alturas de leito estático de 16,69 e 18,33 estes fenômenos se mostraram mais evidentes. Para ambas alturas, houve o acúmulo de material na parede interna da base cônica, com a biomassa apresentando baixa escoabilidade e não retornando para o centro do leito. O arraste das partículas pela corrente gasosa foi observado imediatamente após o rompimento da resistência do leito, porém, após poucos minutos a biomassa permaneceu retida na região anular. Conseqüentemente, o canal formado com o rompimento da resistência mecânica não funcionaria como uma região de jorro, mas como um prolongamento da alimentação do ar e a biomassa poderia ser entendida como uma nova base cônica. Nestes casos, a diferença de pressão entre a alimentação de ar e a sua exaustão foi maior para o sistema vazio em comparação ao sistema com a presença de biomassa, não sendo possível avaliar a fluidodinâmica pela curva característica do leito.

Os fenômenos de instabilidade estariam relacionados a duas causas diferentes. Quando o leito de jorro opera com mistura de partículas com diferentes tamanhos, as partículas finas são arremessadas a maiores distâncias na região da fonte, o que faz com que as partículas grosseiras se acumulem próximo à região de jorro enquanto as partículas menores se acumulam próximo à parede, em um fenômeno conhecido como segregação (Du et al., 2015; Santos et al., 2015). Ademais, biomassas úmidas apresentam forte aderência a superfícies metálicas, o que levaria ao acúmulo de material (Stroem et al., 2009).

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, a queda de pressão total no sistema com $H=16,69$ e $H=18,33$ cm. Embora o leito tenha apresentado instabilidades, os parâmetros fluidodinâmicos foram determinados analogamente ao leito de jorro

estável a fim de comparar os resultados com os demais valores de H . Para $H=16,69$ cm, foi observada uma $u_{mj}=8,84$ m/s e uma $\Delta P_{m\acute{a}x}=0,916$ kPa, além da perda de 9,3% da massa total por arraste. Já para $H=18,33$ cm, foi observada uma $u_{mj}=9,46$ m/s e uma $\Delta P_{m\acute{a}x}=1,088$ kPa, além da perda de 11,76% da massa total por arraste.

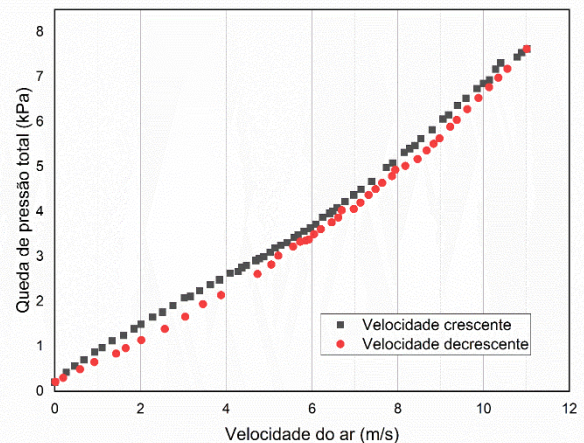


Figura 5: Queda de pressão total no sistema do leito de jorro com bagaço de laranja completamente tratado a $H=16,69$ cm.

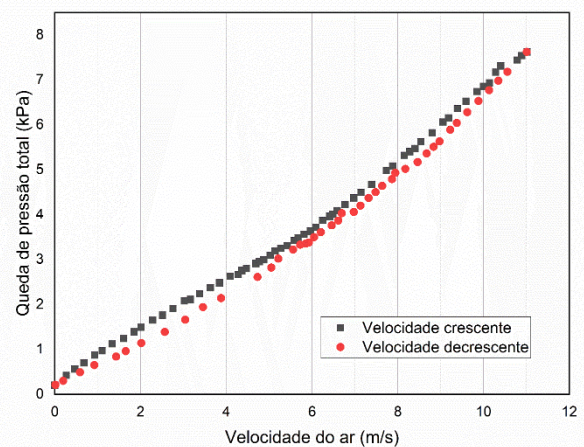


Figura 6: Queda de pressão total no sistema do leito de jorro com bagaço de laranja completamente tratado a $H=18,33$ cm.

Com o aumento de H para 21,12 cm os fenômenos de instabilidade foram atenuados, uma vez houve o arraste das partículas para a região da fonte mesmo com o acúmulo de parte da biomassa nas paredes da base cônica. A Figura 7 apresenta a curva característica do leito, sendo observada uma $u_{mj}=11,11$ m/s e uma $\Delta P_{m\acute{a}x}=1,095$ kPa e o arraste de finos pela corrente gasosa foi de aproximadamente 11,65%.

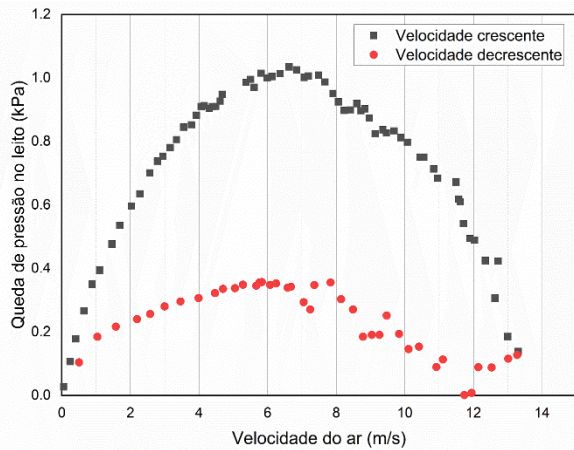


Figura 7: Curva característica do bagaço de laranja completamente tratado em leito de jorro com $H=21,12$ cm.

A Tabela 3 representa todas as informações obtidas nos ensaios de

fluidodinâmica, tanto para os ensaios com o bagaço *in natura* e bagaço parcialmente tratado quanto para as cinco alturas de leito estático com o bagaço completamente tratado. São representadas a ocorrência ou não de um regime de jorro, a massa inicial de biomassa, a queda de pressão máxima, a velocidade de mínimo jorro e a perda de massa pelo arraste das partículas. Pôde-se observar que, com o aumento da altura do leito estático houve um aumento na massa inicial de biomassa e, conseqüentemente, da resistência mecânica do leito. Deste modo, além da maior queda de pressão no leito seria necessária uma maior vazão de ar para estabelecer o regime de jorro (Qin et al., 2012; Santos et al., 2015). Também foi observado que com o aumento da velocidade do ar houve um aumento da perda de massa pelo arraste do ar, de 2,05% para 11,65%.

Tabela 3: Dados referentes à fluidodinâmica do bagaço de laranja em leito de jorro nas condições avaliadas: estabelecimento ou não do regime de jorro, queda de pressão máxima, velocidade de mínimo jorro e perda de massa por arraste.

Condição	H (cm)	m_0 (kg)	Jorro	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (kPa)	u_{mj} (m/s)	Perda de massa
<i>In natura</i>	14,06	1,198	Não	N/A	N/A	N/A
Prensado	14,06	1,21	Não	N/A	N/A	N/A
Prensado+1%CaO	14,06	1,072	Sim	0,916	8,692	2,05%
Prensado+1%CaO	16,69	1,42	Sim	0,822	8,835	9,30%
Prensado+1%CaO	18,33	1,66	Sim	1,088	9,462	11,76%
Prensado+1%CaO	21,12	2,37	Sim	1,095	11,11	11,65%
Prensado+1%CaO	23,91	3,18	Não	N/A	N/A	N/A

CONCLUSÕES

O pré-tratamento proposto no presente trabalho foi suficiente para reduzir a umidade do bagaço de laranja em 31,7%. Essa diminuição, associada à adição da cal, foi necessária para promover a movimentação das partículas no leito de jorro convencional com alturas de leito estático superiores a 14,06 cm, uma vez que o bagaço *in natura* ou prensado não apresentaram mobilidade. O aumento na altura de leito estático de 14,06 para 21,12 cm provocou o aumento da velocidade de mínimo jorro de 8,69 para 11,11 m/s, além do aumento na queda de pressão máxima de 0,916 para 1,095 kPa. No entanto, a operação apresentou problemas relacionados à instabilidade do leito, como o acúmulo de material na superfície

interna da base cônica e a baixa mobilidade após se estabelecer o regime de jorro. Além destes problemas, também foi observado o arraste de parte do leito, havendo a perda de 11,65% da massa inicial para o arraste quando $H=21,12$ cm. Destaca-se, assim, a necessidade de, associado ao pré-tratamento do bagaço de laranja, modificar o leito de jorro para que este opere de maneira estável e sem uma diminuição significativa da massa inicial pelo arraste. Uma possibilidade seria a adição de agitadores mecânicos, que auxiliam a mistura das partículas e reduzem a vazão de ar em comparação ao leito de jorro convencional.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

NOMENCLATURA

u_{mj}	Velocidade de mínimo jorro	m/s
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Queda de pressão máxima	kPa
m_0	Massa inicial do leito	kg
H	Altura de leito estático	cm
u	Velocidade superficial do ar	m/s
ΔP_{leito}	Queda de pressão no leito	kPa
ΔP_{branco}	Queda de pressão no sistema vazio	kPa
ΔP_{total}	Diferença de pressão no sistema	kPa
X_{bu}	Umidade em base úmida	kg/kg
X_{bs}	Umidade em base seca	kg/kg
$m_{\acute{a}gua}$	Massa de água na amostra	kg
m_{total}	Massa total da amostra	kg
m_{seco}	Massa seca da amostra	kg
x_i	Fração mássica retida	
d_{pi}	Abertura da peneira	cm
d_s	Diâmetro de Sauter	cm

REFERÊNCIAS

- Acharjee, A., Afrin, S. M., & Sit, N. (2021). Physicochemical, textural, and rheological properties of yoghurt enriched with orange pomace powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15193>
- Afrin, S. M., Acharjee, A., & Sit, N. (2022). Convective drying of orange pomace at different temperatures and characterization of the obtained powders. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1040–1052. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05108-2>
- Barbosa, A. M., Rocha, T. A. F., Saldarriaga, J. F., Estiati, I., Freire, F. B., & Freire, J. T. (2020). Alternative drying of orange bagasse in vibrofluidized bed for use in combustion. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 152(May), 107941. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107941>
- Cordeiro, L. G., El-Aouar, Á. A., & De Araújo, C. V. B. (2013). Energetic characterization of malt bagasse by calorimetry and thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 112(2), 713–717. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2630-x>
- Du, W., Zhang, L., Zhang, B., Bao, S., Xu, J., & Wei, W. (2015). Pressure drop and pressure fluctuations in spouted beds with binary mixtures of particles. *Powder Technology*, 276, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.016>
- Freire, F. B., Atxutegi, A., Freire, F. B., Freire, J. T., Aguado, R., & Olazar, M. (2017). An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste drying in spouted bed. *Drying Technology*, 35(5), 577–584. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1190937>
- Freire, J. T., Ferreira, M. C., Freire, F. B., & Nascimento, B. S. (2012). A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. *Drying Technology*, 30(4), 330–341. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.638149>
- Ochoa-Martinez, L. A., Brennan, J. G., & Niranjana, K. (1993). Spouted bed dryer for liquid foods. *Food Control*, 4(1), 41–45. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0956-7135\(93\)90126-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0956-7135(93)90126-9)
- Produção de laranjas: Brasil é líder nesse negócio.* (n.d.). Retrieved May 2, 2022, from <https://croplifebrasil.org/noticias/producao-de-laranjas-brasil-e-lider-nesse-negocio/>
- Qin, H., Yang, K., Sun, B., Wang, Q., Xu, C., & Qi, Y. (2012). Experimental Study on Spouted Bed Hydrodynamics for Oil Shale Semi-Coke. *Energy Procedia*, 17, 1740–1746. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.306>
- Santos, K. G., Francisquetti, M. C. C.,

Malagoni, R. A., & Barrozo, M. A. S. (2015). Fluid Dynamic Behavior in a Spouted Bed with Binary Mixtures Differing in Size. *Drying Technology*, 33(14), 1746–1757.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1036284>

Stroem, L. K., Desai, D. K., & Hoadley, A. F. A. (2009). Superheated steam drying of Brewer's spent grain in a rotary drum. *Advanced Powder Technology*, 20(3), 240–244.

<https://doi.org/10.1016/j.appt.2009.03.009>

TetraPak. (2017). Fruit processing. In *The Orange Book* (p. 198).

<https://orangebook.tetrapak.com/chapter/fruit-processing>